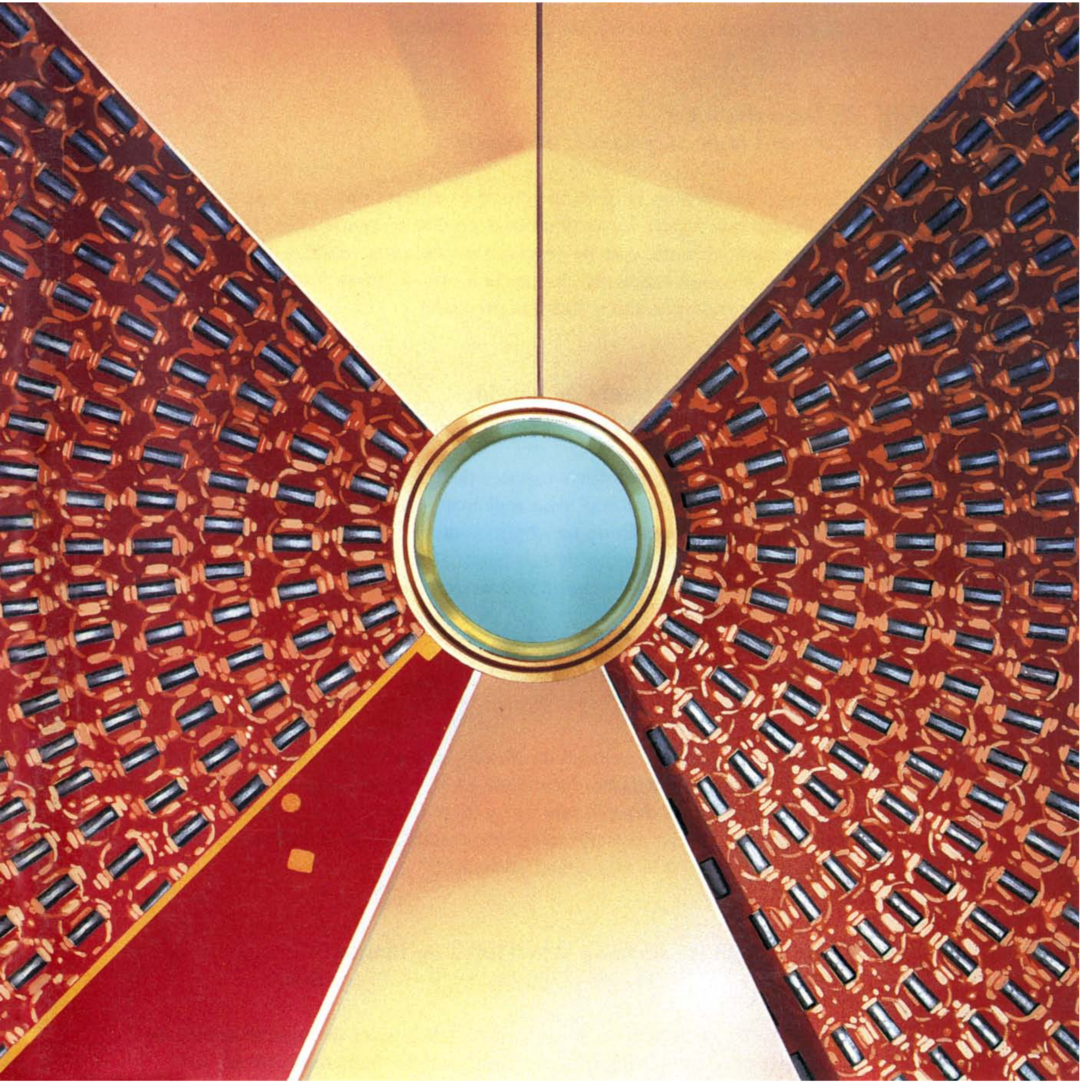
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**



COLISIONADOR LINEAL DE STANFORD

Diciembre 1989

500 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Diciembre de 1989 Número 159

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Oscar Alfranca: *El camino hacia el poderío técnico*; Carme Nogués Sanmiquel: *El huso mitótico*; Amando García: *Microscopios con sonda de barrido*; Anunciación Ilundain: *El calcio, mensajero intracelular*; Manuel Puigcerver: *El monóxido de carbono y la Tierra en llamas*; Ramón Pascual: *El colisionador lineal de Stanford*; José Manuel García de la Mora: *Orígenes de las lenguas indoeuropeas*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

E. Boix, L. Bou y J.-E. Llebot

Ciencia y empresa:

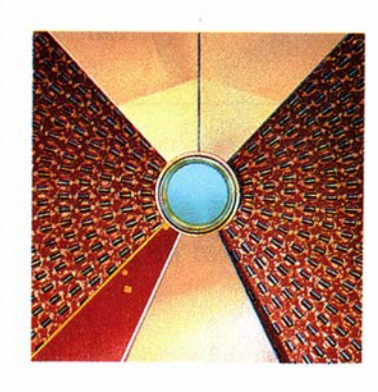
Manuel Puigcerver

Libros:

Jordi Agustí, Luis Alonso, Pedro Molera y Juan Montserrat

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
10-12	Andrew Christie
14	Laboratorios AT&T Bell
19	Mark S. Ladinsky, Universidad de Colorado en Boulder
20-22	George V. Kelvin
23	George V. Kelvin (*arriba*), Matthew J. Schibler (*centro*), Kent L. McDonald (*abajo*)
24	G. V. Kelvin (*arriba y abajo*), Hirohisa Masuda (*centro*)
25	Kent L. McDonald (*arriba*), George V. Kelvin (*abajo*)
26	Mark S. Ladinsky
29	Olaf Wolter, IBM, Sindelfingen
30	Hank Iken
31	R. M. Feenstra, Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM
32-33	H. Iken (*arriba*), P. K. Hansma, California, S. Barbara (*abajo*)
34	Hank Iken
35	Pierre Levy (*arriba*), Yves Martin, C. I. Th. J. Watson de IBM (*abajo*)
36	Hank Iken
47-53	Dana Burns
54-60	Thomas C. Moore
62-65	Ian Worpole
66	SLAC (*izquierda*), Ian Worpole (*derecha*)
67	Ian Worpole (*arriba*), John Seeman, SLAC (*abajo*)
68	Peter Menzel
69	Ian Worpole
73	Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia
74	CERN (*arriba*), S. Publicaciones, U. Valencia (*abajo*)
75-80	A. Silvestre, U. Valencia y Magda Màría
82-83	James Mellaart
84	Andrew Christie
85-86	Johnny Johnson
87	Andrew Christie
88	Johnny Johnson
89	Laurie Grace
90	Johnny Johnson
92	Michael Goodman
93	Jearl Walker
94	Jearl Walker (*izquierda*), Michael Goodman (*derecha*)
95	Jearl Walker
97-99	Hank Iken
100	Mid-America Museum



LA PORTADA representa una sección transversal del detector Mark II, que registra los productos resultantes de la colisión, a altas energías, entre electrones y positrones en el colisionador lineal de Stanford (véase "El colisionador lineal de Stanford", por John R. Rees, en este mismo número). En el centro aparece el tubo donde chocan las partículas. La madeja de cables transmiten los datos desde las cámaras hacia los computadores. El detector ha encontrado varios centenares de partículas Z^0, lo que permite calcular con mayor precisión la masa de esos bosones.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición. S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3.7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace…

José M.ª López Piñero

…trescientos años

Juan Bautista Juanini publicó su *Carta escrita al… doctor don Francisco Redi* y la segunda edición de su *Discurso phisico, y politico*.

Giovanbattista Giovannini, que luego castellanizaría su nombre como Juan Bautista Juanini, estudió medicina en Pavía y ejerció su profesión en esta ciudad y en Milán hasta que en 1667 entró al servicio de Juan José de Austria. Fue su cirujano de cámara hasta la muerte del príncipe en 1679, permaneciendo después en España los doce años que le quedaban de vida. Conviene recordar que el hijo bastardo de Felipe IV fue el prototipo de la nobleza "preilustrada", activamente interesada en la introducción en España de las nuevas corrientes científicas. El médico milanés le dedicó su primera obra y le mantuvo públicamente fidelidad y afecto muchos años después de su fallecimiento. En uno de los libros que publicó con posterioridad a 1679, incluyó un fervoroso elogio suyo y en otro el informe de la autopsia que le hizo al embalsamarlo.

Las ciudades españolas en las que residió Juanini fueron principalmente Zaragoza y Madrid. En la capital aragonesa, estuvo en directa relación con el grupo de médicos *novatores* que encabezaba el catedrático José Lucas Casalete. También tuvo amistad con Joan d'Alós, catedrático de medicina en Barcelona, que era un galenista moderado muy abierto a las novedades. En Madrid, por el contrario, no encontró un ambiente favorable ni siquiera entre los grupos más afines a su mentalidad científica, quizá por razones políticas relacionadas con su estrecha conexión con Juan José de Austria. Por otra parte, estuvo en contacto con importantes figuras médicas extranjeras, entre las que destacan el italiano Francesco Redi y los franceses Raymond Vieussens y François Bayle.

La primera obra publicada por Juanini fue el *Discurso phisico, y politico* (1679), dedicado fundamentalmente al estudio químico de las sustancias que impurificaban el aire de Madrid y sus consecuencias sanitarias. Además de ser traducida al francés (1685), su autor la reeditó en castellano (1689) notablemente ampliada.

AL REY N. S.
D. CARLOS SEGUNDO,
DISCURSO PHISICO,
Y POLILICO,

QUE DEMUESTRA LOS MOVIMIENTOS QUE PRODUce la Fermentaçion,y materias Nitrosas en los cuerpos Sublunares,y las causas que perturban las benignas,y saludables influencias,de que goza el Ambiente desta Villa de Madrid, de que resultan las frequentes muertes Repentinas,breves,y agudas enfermedades,que se han declarado en esta Corte de cinquenta años à esta parte.

EN LA SEGUNDA PARTE SE PONE UN METHODO Preservativo de los malos Vapores,y Exalaciones, que ocasionan las inmundas humedades de las calles de Madrid, que causan malignas,y agudas enfermedades.

DESCRIVESE TAMBIEN LA CALIDAD, Y MODO DE HAZER del *Caphe*,y del *The*, y para que enfermedades aprovechan estas bebidas, Y del modo que se prepara el Vino de la China-China en Inglaterra,y en otras partes,para las Calenturas, Tercianas,y Quartanas.

ESCRITO
POR JUAN BAUTISTA JUANINI, NATURAL DEL Estado de Milàn, Doctor en Medicina,y Cirujia, Cirujano,que fue de la Camara de S.A. el Serenissimo Señor D. Juan de Austria.

CON PRIUILEGIO,

En Madrid,en la Imprenta Real: Por *Mateo de Llanos y Guzman*. Año de 1689.
Hallaràse en casa de Andres Blanco, Librero, en la calle de las Carretas.

Parte Segunda.

SECCION XIV.

En que se trata de la composicion de la bebida, que llaman en Turquia Chaova, y en Europa Caphe; Su antiguedad; Como se haze; Y à quales Enfermedades puede aprovechar; y las que puede ocasionar el vso della?

AViendo hablado del Caphe en la Seccion 4. donde se dixo la vtilidad que de tomarlo se consigue,y por no omitir cosa, que pueda conducir al bien comun, assi en el remediar los achaques que padece,como para preservarse de otros,en que el Publico puede caer,ò sea por ignorancia de no prevenir los daños,que le pueden ocasionar las diferentes bebidas,que se van introduciendo en esta Corte,ò por no saber las que son saludables, y como se ha de vsar dellas,para conseguir su beneficio,dirèmos brevemente el que se sigue del vso del Caphe,su qualidad,y composicion.

En quanto al Chocolate,que es tan comun en esta Corte,y en toda España,y fuera de ella,no ay que advertir otra cosa,sino el condenar el vso de èl por la tarde, y juntamente el tomarle mas de vna vez por la mañana; y la razon es, porque es vna bebida,que no quiere mezclarse con otros alimentos,por quanto con facilidad se fermenta con ellos, causando,vna digestion precipitosa,y corruptible.

Otra bebida se và introduciendo en los Puertos de Mar de España,y en esta Corte empieça à tomar fama de pocos dias à esta parte;y aunque en España es tan nueva, es muy antigua,y muy vsada en otros Reynos, y Provincias. Esta,pues,es la que en Turquia llaman Chaova, y en toda Eu-

Portada de la segunda edición del Discurso *(1689), de Juan Bautista Juanini, y página inicial de su capítulo dedicado al café.*

La *Nueva Idea Physica Natural* (1685), segundo libro de Juanini, es un ambicioso intento de explicación del mundo físico a partir de la "esencia motriz" del mismo, que identifica con las dos sustancias básicas del sistema iatroquímico: las "sales" ácido y álcali. Inicialmente se planificaron tres volúmenes, de los que sólo llegó a aparecer el primero, que se ocupa de las propiedades de dichas "materias motrices" y de la "fermentación" como proceso dinámico fundamental. Quedó manuscrito el segundo, que Juanini acabó de redactar poco antes de su muerte y que estaba consagrado a la aplicación de su doctrina a problemas físicos como la luz, el calor, etcétera. Su última obra, por el contrario, fue una especie de adelanto del tercer volumen, en el que pensaba estudiar el organismo humano y sus enfermedades desde la misma perspectiva.

Dicha obra, titulada *Cartas... en las quales se dice, que el sal ázido y Alcali es la materia que construye los espíritus animales* (1691), es una exposición monográfica de la anatomía, la fisiología y la patología del sistema nervioso. El texto principal es una larga carta que sometió a la crítica de Francesco Redi, cuyo elogioso juicio también se incluye. Como hemos adelantado, esta carta tuvo una primera edición en 1689.

La mera noticia del contenido de sus escritos permite ya adelantar que Juanini fue un seguidor del sistema iatroquímico. Su obra no se redujo, sin embargo, a la reproducción servil de las doctrinas de Thomas Willis y de François de le Boe, Sylvius. Incorporó diferentes novedades, la más importante de las cuales fue la teoría del "espíritu nitroaéreo" de John Mayow, formulación antecesora del descubrimiento del oxígeno, de la que fue uno de los primeros defensores europeos.

Juanini aplicó este sistema a muy diferentes cuestiones. En el *Discurso*, como hemos dicho, el tema central es el análisis del aire de Madrid, las enfermedades que sus impurezas producen y la manera de prevenirlas. Se ocupa también en esta obra de varios capítulos fisiológicos interpretados desde los supuestos iatroquímicos. Expone el funcionalismo digestivo de acuerdo con las ideas de Thomas Willis y de Jean Baptiste Du Hamel. Tras defender la doctrina de la circulación de la sangre, explica los procesos respiratorios según la teoría del "espíritu nitroaéreo", como era de esperar. Incluso ofrece un interesante resumen de fisiología vegetal, basado en las investigaciones del propio Du Hamel y en las de Keneth Digby y Bernardus Swalwe.

El funcionalismo del sistema nervioso fue, no obstante, la cuestión fisiológica más ampliamente debatida por el médico milanés. La teoría que mantiene en las *Cartas* es una interpretación iatroquímica de los viejos "espíritus animales", muy directamente ayudada por los datos neuroanatómicos de Willis y sobre todo de Vieussens y por algunos hallazgos lesionales propios. Se apoya también en Descartes y en Mayow, del que vuelve a tomar la noción de "espíritu nitroaéreo".

Paralelamente a estas cuestiones fisiológicas, aplicó también Juanini la doctrina iatroquímica a diversos problemas patológicos y terapéuticos. Anotaremos únicamente su amplia exposición de la patogenia de la fiebre y del mecanismo de la acción curativa de la quina.

A excepción de la iatroquímica, el aspecto más sobresaliente de su obra corresponde a la antomía normal y patológica. Aunque se ocupó de la morfología de los aparatos digestivo, circulatorio y respiratorio, hay que destacar a este respecto su descripción del sistema nervioso en las *Cartas*, uno de los textos anatómicos de mayor altura entre los publicados en la España del siglo XVII. Incorpora las últimas novedades de la época –entre ellas las primeras indagaciones microscópicas y la recién aparecida *Neurographia* (1685) de Vieussens–, que complementa con su experiencia personal de disector. En sus obras da detalles de las disecciones que realizó en centros como el Hospital General madrileño y los anfiteatros anatómicos de la Universidad de Salamanca y el Hospital de Nuestra Señora de Gracia de Zaragoza.

El interés del médico milanés por la anatomía patológica es paralelo a su preocupación por la morfología normal. La mayoría de las autopsias propias de las que ofrece un informe detallado son ilustraciones de problemas clínicos. Como antes hemos adelantado, una de ellas es la que realizó al embalsamar a Juan José de Austria, que utiliza para aclarar una cuestión neurológica.

Dentro de la renovación científica española, el papel de Juanini no puede ser más relevante. Su *Discurso* fue la primera obra médica plenamente "moderna" que se publicó en España. Muchas de las características del movimiento *novator* iniciado ocho años después se encuentran en ella esbozadas. Le falta solamente uno de sus elementos fundamentales: la dura denuncia del atraso científico español que hombres como Juan de Cabriada realizaron en sus escritos.

El camino hacia el poderío técnico

El gobierno de los Estados Unidos ha depositado su confianza en ambiciosos proyectos de investigación para espolear la competitividad. Mejor sería acelerar la comercialización de nuevas técnicas allí donde pudieran desarrollarse

Robert B. Reich

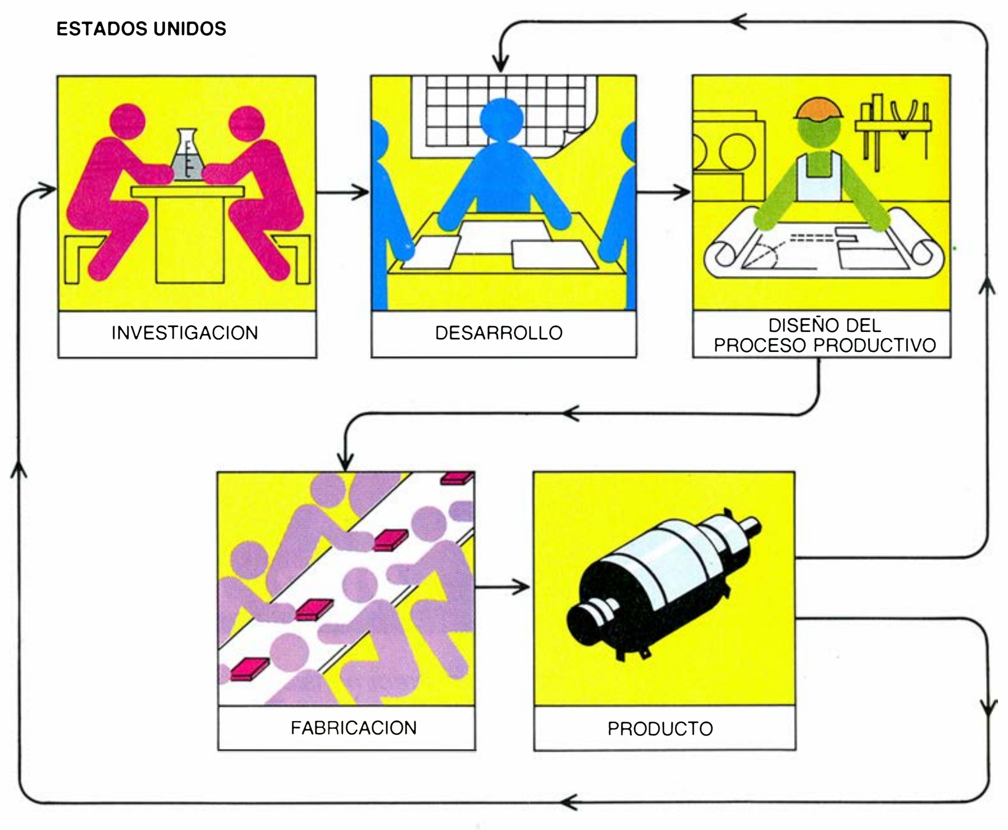
Alarmado por la continua erosión de la posición norteamericana en los mercados mundiales, el gobierno de los Estados Unidos se ha embarcado en ambiciosos proyectos de investigación y desarrollo que permitan importantes aplicaciones comerciales. Aunque ni la administración Reagan ni la de Bush lo han anunciado como tal, las iniciativas de los tres últimos años apuntan hacia un cambio de dirección: gobernantes que se dicen partidarios del mercado libre buscan, en realidad, una política industrial dirigida hacia las altas tecnologías. Algunos de los proyectos pueden estar motivados por cuestiones políticas, o de exclusivo interés científico, más que por necesidades comerciales. Lo que no empece que se les haya presentado al público como necesarios para la competitividad de la nación.

En enero de 1987, por ejemplo, la administración Reagan aprobó un plan de 440 millones de dólares para un acelerador superconductor de partículas. Un portavoz de la Casa Blanca calificó el proyecto como "decisivo" para la futura competitividad de la nación y predijo que las empresas norteamericanas se beneficiarían de sus resultados. Ese mismo año, el presidente anunció una "iniciativa sobre superconductividad" dirigida al desarrollo de aplicaciones prácticas en materiales superconductores y calificó la tecnología como "absolutamente esencial para nuestra competitividad futura".

A principios de 1988, los superordenadores japoneses estaban ya en el mercado "con un resultado mejor del que se esperaba". La Casa Blanca reveló entonces una "estrategia sobre computación de alto nivel", dotada con mil millones de dólares, que habría de desarrollarse en cinco años. La administración anunció también que la Oficina de Proyectos de Investigación Avanzada de la Defensa (DARPA) contribuiría con 100 millones de dólares anuales a SEMATECH, una sociedad de capital-riesgo en la que participaban los fabricantes de semiconductores.

Poco tiempo después se adjudicaron los contratos de construcción iniciales de la estación espacial, argumentando que el laboratorio orbital sería "vital para mejorar la competitividad internacional de la nación en las décadas futuras". Este año se ha caracterizado

ROBERT B. REICH ha venido enseñando economía política y administración en la escuela de dirección de empresas John F. Kennedy de la Universidad de Harvard desde 1981. Fue director de planificación de la comisión federal en comercio bajo el presidente Carter y asesor de la administración Ford. Reich inició su formación en el Dartmouth College, la prosiguió en la Universidad de Oxford y recibió el doctorado en derecho por la de Yale. Autor de varios libros sobre política y competitividad, preside el comité de inspección en biotecnología del gabinete de asesoría técnica del Congreso de los Estados Unidos.



1. NEXOS ENTRE INVESTIGACION Y PRODUCCION en la mayoría de las empresas estadounidenses, lazos que siguen un orden secuencial (*izquierda*); en Japón (*derecha*), la investigación, el desarrollo del producto y el diseño de los procesos de fabricación se llevan a cabo de forma concurrente, y así los

por un repentino interés en la televisión de alta definición: DARPA ha propuesto un programa de investigación de dos años y de 30 millones de dólares para desarrollar dicha tecnología; la administración Bush tiene sobre la mesa planes para conceder garantías antimonopolizadoras y ventajas fiscales a las empresas del país que produzcan equipos de televisión de alta definición.

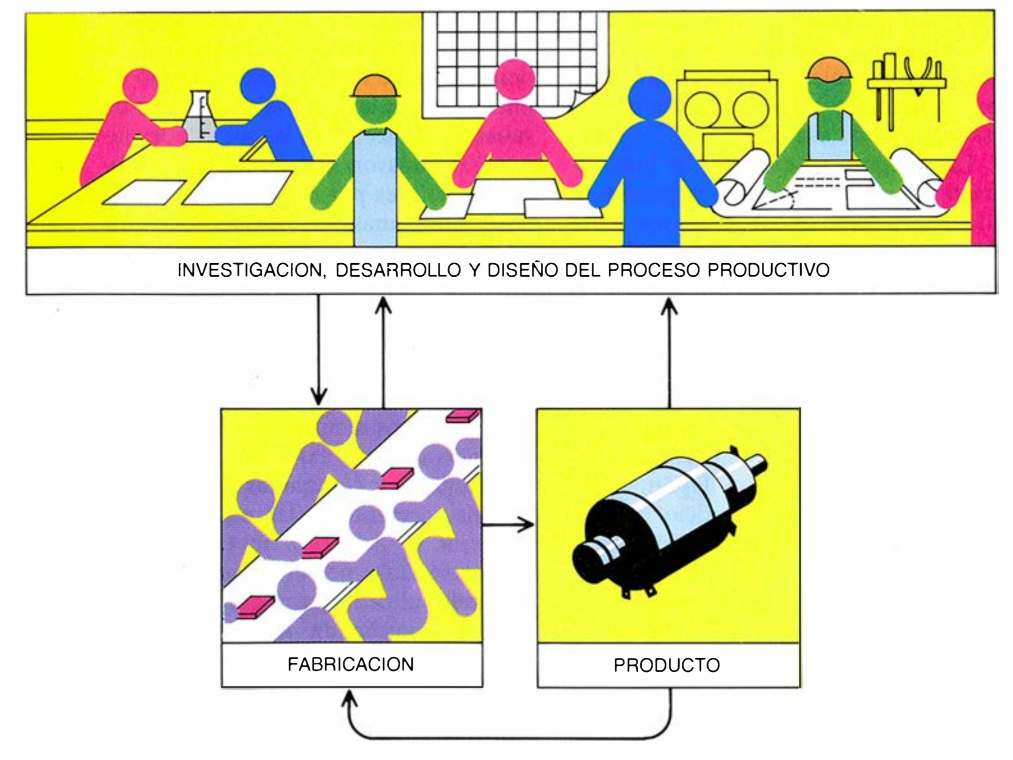
Esta estrategia de largo alcance que pretende restablecer la supremacía técnica de los Estados Unidos demanda no sólo una inversión oficial creciente en investigación y desarrollo de nuevas técnicas, sino también incentivos especiales para fomentar los gastos en investigación y desarrollo del sector privado en áreas no cubiertas por tales proyectos. Algunos políticos reclaman mayores desgravaciones en los créditos destinados a investigación y desarrollo para espolear la inversión en investigación y desarrollo comercial. Denuncian que el porcentaje de producto nacional bruto destinado a investigación y desarrollo sea menor hoy que hace veinte años y señalan que la inversión comercial representa una porción menor del PNB estadounidense que en el caso japonés o alemán.

La voz de alarma dada por los políticos ante la pérdida de competitividad en los mercados mundiales de alta tecnología no está fuera de lugar. La participación norteamericana en el mercado mundial de semiconductores, por ejemplo, cayó del 50 por ciento en 1984 al 37 por ciento en 1988, mientras que la participación japonesa se elevaba hasta más del 45 por ciento. Las empresas no venden sus pastillas ("chips") con memoria dinámica de acceso aleatorio en el mercado libre; los fabricantes de equipos semiconductores industriales se ven obligados a cerrar. Japón se está adueñando de esos campos. La participación norteamericana en el mercado mundial de objetos electrónicos de consumo que incorporan un gran porcentaje de semiconductores –grabadoras de vídeo, filmadoras automáticas de 35 milímetros y reproductores de discos compactos– ha descendido hasta aproximadamente el 5 por ciento desde 1975; el porcentaje del Japón ha saltado desde una cifra cercana al 10 por ciento hasta superar el 25 por ciento. Ninguna empresa estadounidense fabrica máquinas fax, cuyo mercado mundial movió 3000 millones de dólares en 1988; de nuevo, las empresas japonesas están en vanguardia. Japón domina la industria de máquinas-herramienta gobernadas por control numérico. Las firmas niponas están por delante de las norteamericanas en la comercialización de la televisión de alta definición. Recientes estudios del gobierno norteamericano advierten que Japón les aventaja también en la aplicación de materiales superconductores.

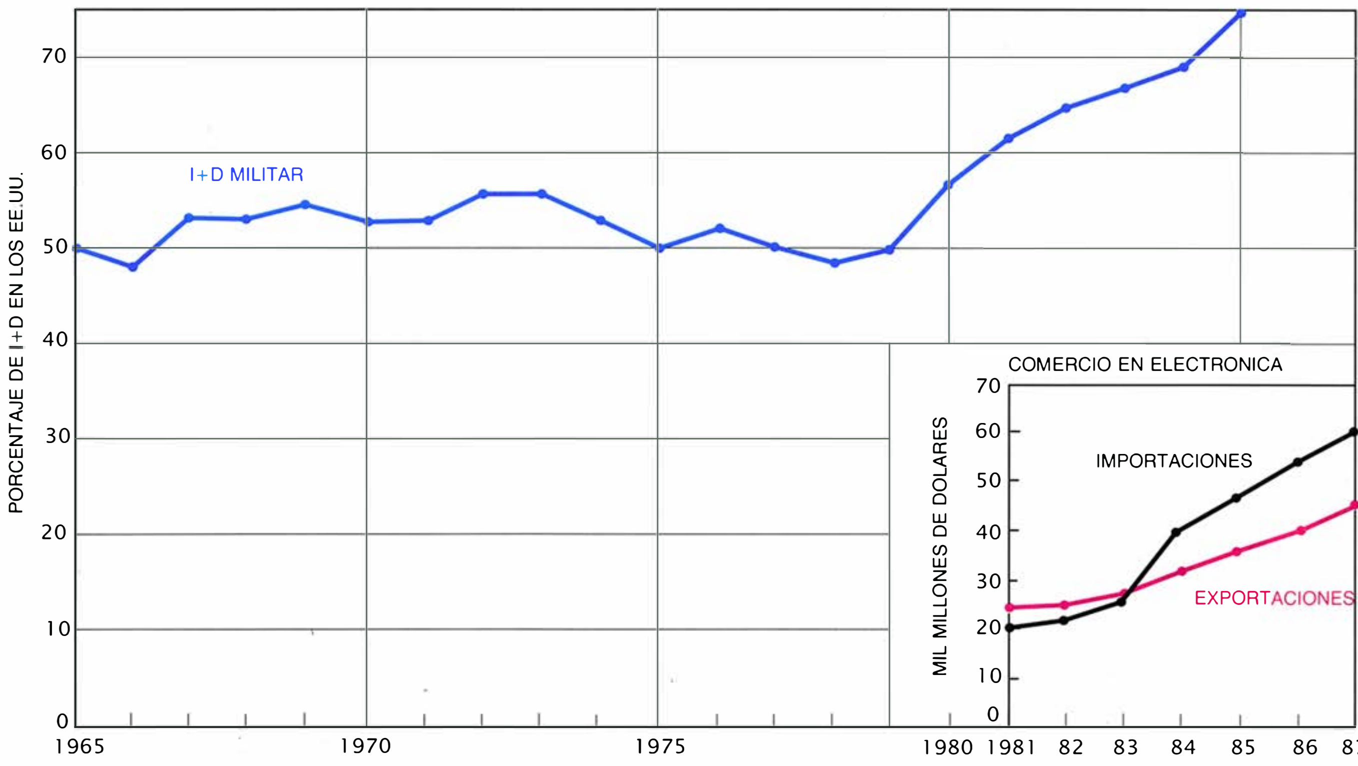
En 1986, la balanza comercial norteamericana en bienes de alta tecnología (semiconductores y equipos de comunicación) fue negativa por vez primera desde que se empezaron a recoger datos sobre el comercio en ese sector. En 1987 y 1988, pese a la drástica caída en el valor del dólar con respecto a las divisas extranjeras, los Estados Unidos anunciaron sólo un modesto superávit en el mercado de alta tecnología. Esta pobre actuación se debe, en parte, a la preferencia de los estadounidenses por los bienes importados de cualquier tipo, pero sobre todo a la pérdida de competitividad en los mercados mundiales.

¿Devolverán los nuevos y ambiciosos proyectos de investigación y desarrollo el liderazgo tecnológico a los Estados Unidos? Parece dudoso. Ese país encabeza ya el mundo por la cantidad y la calidad de su investigación y desarrollo, pero este liderazgo no ha cosechado productos comercialmente competitivos. La investigación universitaria de Estados Unidos, en conjunto, es la mejor del mundo. Los laboratorios de investigación de las grandes empresas no tienen rival. Los investigadores norteamericanos escriben más de una tercera parte de todos los artículos científicos y técnicos publicados en el mundo y crean más patentes que los demás países juntos. El gasto total en investigación y desarrollo en los Estados Unidos, bastante más elevado que el de cualquier otra nación, triplica lo invertido por el Japón.

No hay ninguna razón para suponer que una mayor asignación a investigación y desarrollo –ni siquiera la destinada a determinadas técnicas– resulte en un éxito comercial. El problema radica en la incapacidad de las empresas norteamericanas (o, más exactamente, las secciones estadounidenses de las que se están convirtiendo en empresas mundiales de tecnología) para transformar rápidamente sus descubrimientos en productos de alta calidad y en procesos para diseñar, fabricar, comercializar y distribuir tales productos. Los frutos de la investigación y el desarrollo –nuevos datos, conocimientos, inventos o prototipos– atraviesan fácilmente las fronteras nacionales. Los ganadores en esta competitiva carrera serán, cada vez más, las compañías y naciones que le saquen partido a esos frutos de una manera rápida y general.



conocimientos de un sector pueden influir en decisiones tomadas en otros. Una nueva idea procede hacia atrás y hacia adelante en los distintos grupos que intervienen, hasta que alcanza su perfeccionamiento. El método japonés acelera la transformación de nuevos descubrimientos en productos comerciales.



2. PREDOMINIO DE LA INVERSION en los gastos de la defensa nacional. Acapara las prioridades de investigación en Estados Unidos y reduce los beneficios comerciales que ésta puede reportar. Más de la mitad de la inversión gubernamental en investigación y desarrollo tiene carácter militar; Japón, por contra, le dedica un escaso 5 por ciento. Mientras tanto (*recuadro*), los Estados Unidos se han convertido en importador neto de equipo electrónico.

Los japoneses se han convertido en maestros en descubrir lo nuclear de un hallazgo importante –realizado a menudo en otro lugar– y aprovecharlo para su aplicación y perfeccionamiento. Eran norteamericanos los científicos que inventaron el transistor. En 1953 la Western Electric concedía una licencia de dicha técnica a Sony; la compañía japonesa mejoró rápidamente el transistor y lanzó toda una gama de productos electrónicos de consumo de alta calidad. En 1968, la empresa norteamericana Unimation otorgaba una licencia a Industrias Pesadas Kawasaki para la fabricación de robots industriales. A comienzos de los setenta, los robots industriales trabajaban ya en el Japón; a finales, los robots nipones habían llegado a los Estados Unidos. Mientras tanto, la incipiente industria estadounidense de robótica nunca llegó a valerse por sí sola.

La compañía Ampex de California fue pionera de las grabadoras de vídeo, perfeccionadas por los japoneses. Canon mejoró la idea básica de la copiadora en papel corriente de la compañía Xerox, y modificó la técnica de copia a bajo precio que habían desarrollado para fabricar también impresoras láser baratas (otro invento nunca aprovechado del todo por Xerox).

La historia se ha repetido con materiales compuestos y cerámicas, televisiones en color, discos de ordenador, hornos de revestimiento básico, fundiciones de oxígeno, hornos de microondas, máquinas-herramienta guiadas por ordenador y otros inventos. A 31 de marzo de 1987 (último año fiscal del que se dispone de datos), Japón había comprado a Norteamérica información tecnológica por un valor de más de mil millones de dólares; los Estados Unidos compraron a los japoneses menos de la mitad de esa cifra.

Las empresas japonesas se han encontrado en una posición negociadora ideal para hacerse con la mayor parte de esta tecnología a buenos precios. Las compañías norteamericanas compiten a menudo entre sí para vender a Japón, ante el temor de que una u otra desarrolle un proceso ("know-how") similar y lo venda primero. (Ese razonamiento pudo haber inducido a la compañía Boeing a compartir su técnica aereoindustrial con Japón, antes que aceptar que el beneficio de una venta similar se lo llevara Airbus Industrie.) Ocurre, además, que los pequeños empresarios de técnicas avanzadas carecen a menudo de capacidad para fabricar y comercializar productos a escala mundial o para defender sus patentes en otros lugares; temen, pues, que, si rehúsan vender, sus diseños más avanzados podrán ser presa de versiones basadas en una ingeniería copiadora y fabricadas a un coste menor.

Japón ha coordinado también sus compras, para que sus empresas no tengan que pujar unas contra otras. En diversas ocasiones, su ministerio de comercio exterior e industria (MITI) se ha comportado como una lonja de contratación, forzando a las empresas extranjeras a conceder sus patentes y a negociar pactos con toda la industria japonesa. Entre 1956 y 1978, y debido en buena parte a la prohibición del MITI de subastar las licencias, las sociedades japonesas pagaron sólo nueve mil millones de dólares por el acceso a técnicas norteamericanas cuyo coste de desarrollo oscilaba entre 500.000 millones y un billón de dólares.

Más de uno podría sentir la tentación de levantar barreras contra el flujo internacional de técnicas: redoblando la protección de las patentes y derechos de las empresas norteamericanas, impidiendo que las extranjeras compraran técnicas o compañías de alta tecnología, cerrando a las empresas extranjeras el acceso a investigaciones subvencionadas por el gobierno y presionando al MITI para que cesara la compra coordinada de patentes. El problema principal, no obstante, tiene poco que ver con el fácil acceso de las empresas japonesas a la tecnología de los Estados Unidos. La verdadera ventaja japonesa radica en su capacidad para transformar los nuevos inventos en productos finales de alta calidad.

Si los Estados Unidos quieren recuperar su liderazgo tecnológico, habrán de mejorar su capacidad de aplicación de la técnica. La tranquila senda hacia la competitividad depende menos de ambiciosos proyectos de investigación gubernamentales dirigidos hacia áreas tecnológicas específicas (superordenadores o superconductores de altas temperaturas), que de mejorar el proceso por el que los conocimientos técnicos –independientemente de su lugar de invención– se transforman, en las empresas estadounidenses, en productos de refinada calidad.

Un examen serio del éxito japonés en este empeño y de la correspondiente debilidad de Estados Unidos nos lleva a enumerar seis pasos que es necesario dar para avanzar por la senda de la competitividad: búsqueda de nuevas técnicas por todo el mundo, poner en relación los fondos gubernamentales destinados a investigación con productos comerciales, integración de la fase de investigación y desarrollo de las compañías con la producción, establecimiento de patrones técnicos de normalización, inversión en la formación profesional de los trabajadores e instauración de una buena educación básica para todos los ciudadanos. Transitar por esos pasos será necesario, aunque no suficiente, para que los Estados Unidos recuperen su vigor competitivo en los mercados mundiales.

El primer paso en la pronta asimilación de nuevas técnicas es descubrir en qué consisten. Las empresas norteamericanas se mueven con excesiva lentitud a la hora de percibir el alcance de una nueva técnica hallada en otros puntos y averiguar si se trata de algo realmente innovador, de un método más eficaz de fabricar y ensamblar productos o una forma nueva de organizar la producción y la distribución. Hay investigadores e ingenieros cuya educación académica y temprana experiencia de trabajo transcurrieron cuando los Estados Unidos estaban muy por delante de otras naciones en el desarrollo y uso de técnicas y se muestran ahora escépticos sobre la capacidad de los extranjeros; cualquier cosa "no inventada en Estados Unidos" se considera de poco valor.

La mayoría de las empresas de los Estados Unidos no están organizadas para una búsqueda mundial. No suelen enviar sus investigadores, ingenieros y técnicos a muestras, ferias o exposiciones internacionales, ni a visitar a sus competidores mundiales; no reúnen sistemáticamente datos sobre los resultados de la investigación basada en fondos públicos en otras naciones (ni siquiera, para esta cuestión, en los Estados Unidos) y tampoco vacían de manera rutinaria las revistas y boletines publicados en otros países. El gobierno de los Estados Unidos hace poco por ayudarles en tales esfuerzos.

Las empresas japonesas, por contra, entienden la búsqueda mundial de conocimientos técnicos como parte de su estrategia comercial. Aprovechan los conocimientos adquiridos en otros lugares para completar su propia experiencia técnica. Organizan equipos de estudio para visitar empresas norteamericanas y europeas, así como laboratorios de investigación universitarios. Asisten a todas las ferias importantes y examinan con detenimiento las publicaciones extranjeras, incluidos los boletines gubernamentales. Y hasta subvencionan la investigación en universidades y laboratorios de empresas norteamericanas, asegurándose de que científicos, ingenieros y técnicos japoneses se instruirán con los resultados. (El año pasado, unos 5000 científicos japoneses trabajaron en laboratorios de los Estados Unidos; se estima que, como mucho, no llegaron a 150 los científicos estadounidenses que lo hicieron en laboratorios japoneses, la mayoría sólo por unos meses.) Los departamentos del gobierno japonés reúnen también información técnica procedente de todo el mundo y la hacen asequible a la industria. (La oficina para la ciencia y la técnica industrial del MITI, por ejemplo, subvenciona un complejo sistema de recopilación de datos.)

Las empresas japonesas participan también en sociedades de capital-riesgo con empresas americanas, con el expreso propósito de aprender a diseñar y fabricar nuevos productos. El objetivo japonés a largo plazo de producir un avión a reacción, por ejemplo, se está consiguiendo en el ámbito de una sociedad de capital-riesgo creada con Boeing para el desarrollo marco de una nueva generación de prototipos de reactores de tamaño medio y dentro del acuerdo, aprobado recientemente para cofabricar un sucesor del caza F16, firmado con la empresa General Dynamics.

Veamos el segundo paso, estrechamente relacionado con el anterior, para mejorar la asimilación de nuevas técnicas: establecer puentes de comunicación entre la investigación subvencionada con fondos públicos y la fabricación comercial. Los nuevos avances en investigación y desarrollo deben estar a disposición de su empleo en procesos productivos; asimismo, los descubrimientos en nuevos productos han de hallarse en continua relación con la investigación y el desarrollo.

Una razón por la que los fondos públicos que Japón destina a investigación tienden a estar mejor acoplados con la producción comercial que los de los Estados Unidos reside en el predominio, en aquel país, de la investigación relacionada con la defensa. La partida de defensa representa allí sólo el 3 por ciento de la subvención oficial a la investigación, en tanto que los Estados Unidos dedican a esa parcela el 70 por ciento. (Una asignación que supera la tercera parte de la inversión oficial norteamericana en investigación y desarrollo.)

Muchas técnicas relacionadas con la defensa admiten usos civiles, y hay una larga historia de avances civiles desde inventos del sector de la defensa: ordenadores, circuitos integrados y materiales de alta resistencia, entre ellos. Pese a todo, varios factores dificultan el tránsito de las aplicaciones militares a las comerciales. La mayor parte de la investigación militar no es accesible porque está reservada. En muchos casos, las características militares exigen un mejor funcionamiento –y un precio mayor– que el que los consumidores necesitan o quieren. En otros, las técnicas del sector comercial han superado el estado de conocimientos militares, por lo que la investigación y desarrollo en defensa ofrecen escasa información de valor comercial. Así, el Departamento de Defensa presenta un retraso notable con respecto al sector comercial en el uso de la electrónica digital de cualquier tipo. Por último, los que trabajan en el desarrollo técnico de la logística militar, sean empresas abastecedoras o investigadoras de los laboratorios oficiales, suelen centrarse en misiones específicas que desde arriba se les marca, sin preocuparse por el interés o aplicación comercial de sus ideas.

A pesar de que la investigación y el desarrollo militares se hayan convertido en un medio incapaz de generar resultados comerciales, casi la mitad de los fondos federales dirigidos a la investigación en superconductividad, por ejemplo, se destinan a su aplicación militar; verbigracia: sensores de infrarrojos, detectores submarinos y cañones electromagnéticos. Ello contrasta con el ejemplo japonés, cuyo gobierno ha organizado y financiado múltiples proyectos centrados, expresamente, en los

usos comerciales potenciales de los superconductores.

Otros sectores de la administración con capacidad investigadora y sin relación directa con los asuntos militares –el Instituto Nacional de la Salud, el Departamento de Energía y la Fundación Nacional de la Ciencia– tienden hacia intereses de muy lejana aplicación comercial. Apoyan, principalmente, la investigación básica.

De nuevo, el contraste con Japón es aquí clamoroso. Si bien ese país gasta ahora en investigación básica más que en años anteriores, la mayoría de sus esfuerzos en investigación y desarrollo se encaminan hacia su pronta comercialización. Entre sus objetivos explícitos se declara el de ayudar a las pequeñas y medianas empresas para la incorporación de nuevas técnicas. El gobierno dispone de una red de 195 laboratorios regionales con la misión específica de proporcionar asistencia técnica a las pequeñas y medianas empresas. El gobierno central absorbe la mitad del coste; las autoridades locales y las empresas pagan el resto.

Además, Japón organiza grupos interempresariales para investigar de forma conjunta sobre los problemas de orden técnico que puedan aparecer. La oficina para la ciencia industrial y la técnica del MITI negocia los términos de tales consorcios y contribuye con una modesta aportación. El MITI ha establecido recientemente 28 centros regionales de tecnología que habrán de facilitar a las grandes empresas la convergencia de sus esfuerzos investigadores.

La estrategia japonesa para la televisión de alta definición ilustra el proceso. NHK, la sociedad emisora nacional, empezó las investigaciones en televisión de alta definición en 1970; compartió sus resultados con 11 fabricantes nacionales de televisión. Dos ministerios del gobierno tomaron las riendas de la coordinación de las investigaciones, repartiéndolas entre empresas, de forma que no se duplicaran los trabajos y asegurando que compartieran los resultados. El Banco de Desarrollo Japonés aportó los fondos de las empresas, los mismos que los donados por el erario público. Hasta los servicios postales japoneses empezaron a promover la televisión de alta definición, estableciendo planes de ahorro para los usuarios; significa todo ello que tendrán preparado el mercado para esa televisión una vez lograda su viabilidad comercial.

Tercer peldaño: las empresas norteamericanas deberán ligar estrechamente su esfuerzo en investigación y desarrollo con su aplicación comercial. A diferencia de las empresas japonesas, la mayoría de las estadounidenses se caracterizan por el profundo hiato entre el laboratorio de investigación y la planta de producción y comercialización. La mayoría de los investigadores e ingenieros de estas sociedades trabajan en laboratorios que están alejados, geográfica y culturalmente, de las fábricas, almacenes y puntos de distribución donde sus ideas deberían llevarse a la práctica. Las instalaciones dedicadas a la investigación suelen hallarse en modernos edificios, al estilo de ciudades universitarias, rodeadas por un entorno bucólico. Y en lo concerniente a reputación, se considera que el trabajo realizado por los investigadores e ingenieros es más importante y elevado que el de sus compañeros a pie de fábrica.

La investigación y el ensayo suelen mantener una conexión débil con el resto de los trabajos de la empresa. Las propuestas que surgen de los laboratorios son examinadas por analistas financieros y de mercado, proyecto por proyecto; sólo entonces, si se aprueban, pasan a la mesa de los in-



3. ENTORNO BUCOLICO de estas instalaciones de los laboratorios Bell de AT&T, en Holmdel, New Jersey. Esa ubicación de muchos centros de investigación en Estados Unidos favorece la creatividad, pero la separación de los laboratorios de investigación de la planta fabril puede restar a las empresas competitividad ante sus homólogas japonesas en la transformación de los nuevos descubrimientos en productos lucrativos y en los procesos para fabricarlos.

genieros y técnicos de planta, que prepararán los procesos de fabricación y distribución del producto.

El supuesto implícito que se esconde tras esta serie de acontecimientos es el que da por sentado que el diseño de un producto nace, en esencia, totalmente conformado después de la investigación, y pasa al proceso productivo. No es insólito que las empresas norteamericanas dejen cualquier consideración sobre la producción hasta que los investigadores encuentren una solución general al problema principal y los ingenieros de planta transformen esta solución general en un patrón específico. Esta división prolonga el tiempo de desarrollo de los productos y provoca la pérdida de oportunidades en el proceso de comercialización.

En Japón, la investigación y el desarrollo avanzan al paso de la ingeniería de producción y los procesos de fabricación. No hay ningún hiato, ni geográfico ni cultural. El proceso incorpora continuos tanteos de ensayo y error, a modo de catapultas de la innovación entre el ensayo y la fabricación. La teoría no antecede necesariamente a la aplicación, ni el diseño del producto precede necesariamente al diseño del proceso; todas las etapas ocurren a la vez.

Sólo en raras ocasiones se presenta formalmente, se examina y se pone en marcha el diseño de un producto nuevo. En cambio, los productos y procesos existentes sufren exámenes continuos y más detenidos, mientras que investigadores, ingenieros y técnicos adquieren conocimientos y experiencias que pueden resultar en mejoras. Un ejemplo de este ensayo in crescendo lo tenemos en el uso de cerámicas en los motores de combustión interna. No se trata de desarrollar nuevas máquinas que incorporen cerámicas (verbigracia, motores de turbina cerámica), algo que algunas empresas estadounidenses se esfuerzan en conseguir con ayuda federal. Las empresas japonesas están desarrollando motores con pistón de cerámica e incorporarán, de forma creciente, partes cerámicas en un diseño, por lo demás, clásico.

Paso número cuatro: los Estados Unidos deben adoptar con presteza unos niveles de normalización válidos para toda la industria, que posibiliten la compatibilidad de las nuevas técnicas y aceleren su aceptación comercial. La normalización facilita a los consumidores la experimentación con equipos que incorporan nuevas técnicas, sin correr el riesgo de confiarse a una técnica que rápidamente quede envejecida. Ahora bien, una normalización precipitada puede congelar el desarrollo de técnicas todavía inmaduras. Un ritmo adecuado y una aceptación general de la normalización y certificación son factores decisivos en el éxito de la técnica.

En los Estados Unidos, los patrones normalizados se establecen prestando escasa atención a tales cuestiones. Las grandes compañías o las oficinas gubernamentales establecen las normas "de facto"; otros organismos del gobierno u organizaciones sin afán de lucro establecen estándares oficiales. Por desgracia, ninguna de estas fuentes de certificación posee la responsabilidad exclusiva de gestionar el proceso de normalización que mejor promueva una nueva técnica. Ni tienen personal suficiente para acometer con eficacia una tarea de ese tenor.

La Comisión Federal de Comunicaciones (CFC) rechazó recientemente la normalización propuesta por los japoneses sobre televisión de alta definición; adujo que era incompatible con los aparatos de televisión existentes. Esta decisión supuso, para la Zenith Electronics, el único fabricante de televisores de patente estadounidense que queda (y para cualquier empresa norteamericana que viera en ello una ocasión para aprovecharse con la televisión de alta definición), una moratoria que le posibilitara desarrollar una técnica apta para el mercado interior. Esta consecuencia, sin embargo, pasó inadvertida: la CFC carece de poder para incentivar la competitividad norteamericana y conocimientos suficientes para llevar esto a la práctica. Tras el rechazo norteamericano de las propuestas japonesas sobre televisión de alta definición, el gobierno japonés está coordinando el desarrollo de una nueva norma que será compatible con los receptores que se utilizan en los Estados Unidos.

Los japoneses siguen un enfoque más hábil en el ámbito de la certificación y normalización. Dejan que los competidores rivalicen entre sí para establecer la norma de un nuevo producto, como ocurrió con los estándares de VHS y Beta para videocassettes; mientras, un departamento del MITI se encarga de coordinar las normas industriales que aseguren la eficaz adopción de sus nuevas creaciones técnicas.

La quinta exigencia para lograr un empleo rentable de la técnica recae sobre la fuerza de trabajo. Debe ser competente y habilidosa para descubrir la manera de transformar los conocimientos en procesos de fabricación y productos. Las compañías japonesas invierten muchos años desarrollando y perfeccionando posibilidades técnicas, una vez los han descubierto o comprado en cualquier lugar del mundo. Desde la compra de la técnica de grabadoras de vídeo a una compañía estadounidense por parte de Sony hasta el desarrollo del producto pasaron 19 años; el Betamax, introducido en 1975, fue la cuarta generación de la técnica de videograbadoras de la empresa. (Gracias a los procesos de producción automatizada desarrollados por Sony, el Betamax costó, como mucho, una centésima parte del precio de fabricación de la primera generación de grabadoras de vídeo.) La misma historia se repite para la televisión de alta definición: la investigación comenzó en 1970 y la producción comercial no empezará hasta 1991.

Frente a lo que se cree en los Estados Unidos, semejante tenacidad no se debe sólo a la visión a largo plazo que los japoneses tienen sobre las ganancias potenciales de una dirección técnica determinada. Los nipones se han mostrado deseosos de invertir en líneas sin resultados inmediatos; y ello, aunque los problemas que esa corriente debiera solucionar se resuelvan con un sistema de la competencia.

En tales casos, la inversión no mira tanto la técnica en cuestión cuanto la formación profesional recibida por los trabajadores que laboraron en ella. Una vez formada, esta mano de obra bien preparada puede reconocer el valor potencial de una gama amplia de nuevas técnicas y adaptarlas a los productos y procesos que sobrevengan.

La experiencia a largo plazo en la resolución de problemas técnicos asociados con la grabación en cintas de vídeo y con la fabricación de las grabadoras dio, a los trabajadores de Sony, base para resolver otros problemas de electrónica de consumo; un valioso activo, a pesar del fracaso de Betamax. La compañía triunfó, por contra, en la promoción de una norma única para la nueva generación de grabadoras de vídeo de 8 milímetros y logró incorporar parte de su técnica Beta en las unidades VHS que fabrica actualmente.

Muchas empresas japonesas andan buscando la manera de utilizar superconductores de alta temperatura. Su éxito no se medirá sólo por su triunfo en el empeño logrando estos o aquellos productos, estos o aquellos procesos (así, los intentos de Nippon Steel para desarrollar técnicas de fundición de trenzado continuo usando imanes superconductores para levitar y confinar el acero fundido). El éxito tendrá otro

SEIS ETAPAS HACIA EL PODERIO TECNICO
Buscar nueva información por todo el mundo
Integrar la investigación y el desarrollo financiados por el gobierno en la producción comercial
Integrar la investigación y el desarrollo financiado por las empresas en la producción comercial
Normalización y certificación
Invertir en la capacitación técnica
Proporcionar una buena educación básica a todos los ciudadanos

4. CAMINO hacia la recuperación del poderío técnico; requiere inversión en la capacitación de los trabajadores, en todos sus niveles, y en innovaciones ligadas a objetivos comerciales. Estados Unidos presenta un retraso en ambas áreas.

listón: el de cuán amplia y profundamente su fuerza laboral entienda las posibilidades comerciales que ofrece esta nueva línea técnica y su capacidad de adaptarla a otros fines en el futuro. De manera similar, los 11 fabricantes de televisión japoneses que están invirtiendo en la televisión de alta definición saben que sólo unos pocos de entre ellos se harán con el liderazgo de la industria, pero también se dan cuenta de que sus trabajadores deben conseguir experiencia en esa nueva técnica, si pretenden desarrollar otras aplicaciones de la misma en el futuro.

Las empresas norteamericanas se muestran más remisas que sus homólogas japonesas a invertir en la formación técnica y a largo plazo de sus trabajadores; ello obedece, en parte, a que la comunidad financiera de Estados Unidos exige beneficios a corto plazo. Demos un ejemplo. El pasado abril, el presidente de Control Data Co. (CDC) anunció que la empresa abandonaba sus negocios en superordenadores; destacó que CDC no podía soportar por más tiempo la pérdida de 100 millones de dólares anuales en la investigación de dicha técnica. La compañía había estado sometida a una intensa presión de los accionistas para que aumentara el precio de sus participaciones. Por contra, un ejecutivo de Hitachi declaró al *New York Times* que su empresa continuaría gastando 100 millones de dólares anuales en la investigación y desarrollo de los superordenadores. Y lo explicó así: "Financieramente hablando, no es un buen negocio. Pero los superordenadores constituyen el buque insignia de la técnica de la computación."

Las empresas norteamericanas tienen otra razón, tal vez más válida, para regirse por el corto plazo en las inversiones en su fuerza de trabajo: allí, los ingenieros cambian frecuentemente de empresa, de manera que los beneficios que consiguen del aprendizaje en una puede cosecharlos otra. (Los ingenieros y los trabajadores japoneses, por contra, suelen permanecer toda la vida en la misma empresa, por lo que la inversión en experiencia técnica retorna a la empresa que los formó.) La movilidad laboral estadounidense crea centros tecnológicos como Route 128, en los aledaños de Boston, y el Silicon Valley, en California, pero tiende a desanimar la inversión en capital humano de cualquier empresa.

El resultado final es que muchas empresas estadounidenses optan por comprar componentes o procesos de fabricación cuyo coste ha demostrado su rendimiento en otras partes. Para los consejos de administración, los costes más elevados y los mayores riesgos de la investigación doméstica no se compensan con la posibilidad de que sus ingenieros y trabajadores aprendan una nueva técnica y la perfeccionen en el futuro.

Peldaño sexto: los Estados Unidos deben mejorar la educación básica de todos los ciudadanos. Aun cuando las empresas pretendan invertir en la formación profesional de sus trabajadores, el éxito de esas inversiones depende, sobre todo, de la capacidad de los empleados para aprender, lo que depende, a su vez, de la calidad de su educación básica. Y eso escasea también en los Estados Unidos. Mientras comparte el mismo éxito que Japón en la preparación del 20 por ciento de su población más inteligente y afortunada para tareas profesionales y de gestión, los Estados Unidos están lejos de conocer idéntica suerte con el 80 por ciento restante. Los estadounidenses de 13 años son los últimos en matemáticas, y casi los últimos en ciencias entre 11 países, de acuerdo con un muestreo reciente realizado por el Departamento de Educación y la Fundación Nacional de la Ciencia. Los obreros que sean ignorantes en ciencias y matemáticas no estarán capacitados para incorporar los nuevos conocimientos científicos en el trabajo, ni para adaptarlos a los productos y procesos ya existentes.

En resumen, los Estados Unidos van tras Japón en muchas áreas cruciales para el éxito comercial porque sus ciudadanos no están preparados para aplicar con eficacia las nuevas técnicas. Es cierto que ha empezado a mejorar su capacidad para el uso de las nuevas técnicas, pero ha sido un progreso desigual, carente de la solidez suficiente para recuperar los mercados mundiales.

Algunas empresas importantes (IBM, Hewlett-Packard y 3M) han intensificado sus esfuerzos para explorar, por todo el mundo, los conocimientos técnicos que se producen y están buscando nuevas vías de integración de la investigación y el desarrollo con los procesos de fabricación. Parejamente, ciertas oficinas gubernamentales han comenzado a poner énfasis en el aprovechamiento de nuevas técnicas. En ese contexto, el Servicio de Modernización de Michigan, por ejemplo, ofrece asistencia técnica en la aplicación de diseño asistido por ordenador y de técnicas de producción para más de 6000 pequeñas fábricas de utillaje, maquinaria y ferretería de ese estado. Una reciente legislación federal ha autorizado al Instituto Nacional de Normalización y Tecnología (la antigua Oficina Nacional de Pesos y Medidas) a ayudar a las pequeñas empresas a mejorar su productividad mediante la aplicación de nuevos métodos y herramientas de fabricación. La Fundación Nacional de la Ciencia ha financiado buen número de centros de investigación en ingeniería por todo el país, cada uno de los cuales se concentra en un conjunto peculiar de problemas de los procesos de fabricación. Varios laboratorios federales están creando oficinas de investigación y aplicaciones técnicas para promover la difusión de sus descubrimientos; se las ha autorizado a subvencionar licencias exclusivas a explotadores comerciales, incrementando así los incentivos financieros para el desarrollo del producto.

La educación en la escuela primaria y secundaria se está ya revisando en Arkansas, Minessota y algunos estados más. Muchos estados han elevado el nivel de exigencia en ciencias y matemáticas para la graduación en la enseñanza secundaria; algunos han aumentado el salario de los maestros. (Aunque las pruebas normalizadas no son las mejores guías, la puntuación media en Carolina del Sur, por ejemplo, ha subido 36 puntos desde que comenzó a regir la reforma educativa en 1984. En California, la proporción de graduados de enseñanza media con más de tres años en matemáticas o ciencias se ha incrementado escasamente en un 6 por ciento durante el mismo período.) Muchas empresas y gobiernos locales han mostrado un renovado interés por la instrucción desde

el puesto de trabajo, al objeto de capacitar a los empleados en el manejo de un abanico de nuevas técnicas.

Se necesitará mucho más que eso. En lo que al sector público concierne, la tranquila senda que lleva hacia el liderazgo técnico no requiere unos gastos significativamente mayores en investigación y desarrollo; más convendría una diferente ubicación del dinero. Los proyectos a gran escala de investigación y desarrollo financiados por la partida de gastos militares deberían establecer puentes de relación con los proyectos de desarrollo y producción de las empresas estadounidenses, con la subvención de otros departamentos expresamente encargados de espolear la comercialización de la nueva técnica. Habría que insistir, en tales proyectos, en ofrecer a los ingenieros y expertos una experiencia en la aplicación de esas nuevas técnicas. SEMATECH, la empresa de capital-riesgo dedicada a los semiconductores, constituye un buen punto de arranque, pero el departamento de Defensa, que la financia, no cuenta con ningún experto en el desarrollo comercial de nuevas técnicas; el proycto parece, además, volcado al desarrollo de equipos para la fabricación de semiconductores, sin considerar la difusión del aprendizaje entre las empresas participantes.

Los Estados Unidos deben también invertir mucho más en educación básica y capacitación profesional. Se ha escrito profusamente sobre este asunto, y parece claro que la simple asignación de más dinero público no es la panacea. Además de la transmisión de conocimientos básicos, los estudios primarios y secundarios deben insistir menos en la memorización y promover más el pensamiento crítico; es decir, el ingenio para acotar un problema, formular las preguntas necesarias y descubrir pautas estructurales en el desorden aparente. A los profesores se les ha de conceder, y ellos aceptar, mayor responsabilidad sobre lo que se enseña en clase y sobre la forma en que se enseña. A los padres y otros miembros de la comunidad corresponde contribuir con mayor decisión en la misión educativa.

En lo que se refiere al sector privado, el camino que lleva al liderazgo técnico necesita una colaboración más estrecha entre investigadores, ingenieros de fábrica y vendedores, dentro de cada empresa, amén de esfuerzos mucho mayores para conservar a los ingenieros capacitados.

Las leyes y normas que rigen los mercados financieros podrían modificarse para permitir que las empresas contaran con recursos financieros a largo plazo para el desarrollo de sus productos. El gobierno federal subsidia opciones y compras; empresas que piden prestadas enormes sumas de dinero para tales propósitos pueden deducir sus pagos por intereses de su cuota en el impuesto de sociedades. Las ventajas fiscales deberían dirigirse mejor hacia actividades que promuevan el crecimiento a largo plazo. Un paso en ese camino correcto sería suprimir los incentivos fiscales a opciones y compras, aumentar los impuestos sobre incrementos de capital generados por la venta de activos poseídos menos de seis meses y rebajar los impuestos sobre la venta de patrimonio mantenido por más de seis años.

Tal vez el obstáculo más difícil de superar en ese camino sea la falta relativa de visibilidad e interés. Los proyectos de investigación a gran escala constituyen los mojones de esa andadura y ofrecen una señal clara de que se está haciendo algo para mejorar la competitividad de los Estados Unidos. Más difícil resulta medir y cuantificar la cooperación, estrecha y eficaz, entre el gobierno y las instituciones educativas y empresariales. Significa ello que los políticos, los educadores y los empresarios que avanzan por esa senda podrían hallar dificultades en la solicitud de créditos para proseguir la marcha. De entre todos los impedimentos, este factor podría convertirse en el principal obstáculo que les cerrara el paso.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PROFITING FROM TECHNOLOGICAL INNOVATION: IMPLICATIONS FOR INTEGRATION, COLLABORATION, LICENSING AND PUBLIC POLICY. David J. Teece en *Research Policy*, vol. 15, n.º 6, págs. 285-305; diciembre de 1986.

DOES TECHNOLOGY POLICY MATTER? Henry Ergas en *Technology and Global Industry: Companies and Nations in the World Economy*. Dirigido por Bruce R. Guile y Harvey Brooks. National Academy Press, 1987.

THE DEFENSE INDUSTRIAL AND TECHNOLOGY BASE, VOL. 1. Defense Science Board, Office of the Undersecretary of Defense for Acquisition, octubre de 1988.

INDUSTRIAL POLICY OF JAPAN. Ryutaro Komiya et al. Academic Press, Inc., 1988.

THE SOURCES OF INNOVATION. Eric von Hippel. Oxford University Press, 1988.

TECHNOLOGY POLICY AND ITS EFFECT ON THE NATIONAL ECONOMY. U.S. House of Representatives, Committee on Science, Space and Technology. Technology Policy Task Force, U.S. Government Printing Office, Serial R, diciembre de 1988.

ORGANIZING FOR MANUFACTURABLE DESIGN. James W. Dean, Jr., and Gerald I. Susman en *Harvard Business Review*, n.º 1, págs. 28-36; enero/febrero de 1989.

El huso mitótico

Se empieza a esclarecer la forma en que esta máquina biológica en forma de huso parcela el ADN de una célula en división en dos grupos iguales. El huso demuestra ser tan dinámico cuan preciso

J. Richard McIntosh y Kent L. McDonald

Para que un organismo se desarrolle, repare los tejidos dañados y se reproduzca, sus células deben proliferar, lo que se realiza en dos etapas. Primero, la célula paterna crece; sintetiza el material necesario para dos de ellas dentro de una sola membrana celular, incluyendo un duplicado de cada cromosoma, o hebra de doble cadena de ADN, en el núcleo. A continuación, la célula se divide.

La división empieza con el proceso de la mitosis, donde los cromosomas previamente duplicados (y, por consiguiente, los genes que transportan) se separan en dos paquetes iguales y bien segregados. La mitosis asegura que, cuando el resto de la célula se divida, en un proceso llamado citocinesis, cada célula hija contendrá la información genética necesaria para crecer y dividirse.

Dado que la separación precisa de los cromosomas es decisiva para la capacidad de las células hijas de sobrevivir y reproducirse, muchas generaciones de investigadores han intentado descubrir el proceso en que se lleva a cabo. Ese empeño ha conocido éxitos y fracasos.

Hace más de 100 años se identificaron los caminos que siguen los cromosomas cuando se mueven hacia los polos opuestos de la célula paterna. Descubrióse que los movimientos estaban determinados, en gran parte, por un extraordinario sistema de fibras conocido, en razón de su forma, por huso mitótico. Quizá la manera más clara de poner de manifiesto la importancia del huso sea a través de los efectos que produce su ausencia: si experimentalmente se bloquea el desarrollo del huso, los cromosomas se desplazan muy poco y la segregación en dos grupos distintos fracasa.

Durante mucho tiempo, los pormenores de la estructura del huso y su comportamiento se resistieron a los investigadores, en parte debido a la extrema fragilidad de los componentes de las fibras. Además, las fibras, muy finas, se hallan estrechamente agrupadas para ser observadas con nitidez en el microscopio óptico y resultan demasiado largas y curvilíneas para someterse a un rastreo fácil en el microscopio electrónico.

A lo largo de los últimos 15 años, sin embargo, las nuevas técnicas de marcaje y el perfeccionamiento de otros métodos en microscopía nos han permitido, a nosotros en la Universidad de Colorado en Boulder y a científicos de otros centros, adentrarnos en el huso desde un nuevo enfoque. Se conocen ahora muchos detalles sobre los cambios que sufre esa estructura celular en cada estadio de la mitosis. Y podemos empezar a atisbar la respuesta que merece la pregunta fundamental y que no es otra que la siguiente: ¿a quién corresponde el control de la intrincada actividad coreográfica del huso —y, por tanto, el movimiento de los cromosomas— durante la mitosis?

La mitosis suele describirse como el conjunto de cinco estadios consecutivos que precisan alrededor de una hora para completarse todos. El primer estadio, llamado profase, empieza cuando los filamentos de ADN que se replicaron durante la interfase (el periodo entre dos divisiones celulares) se condensan para formar los distintos cromosomas, cada uno de los cuales consta de dos partes genéticamente idénticas, llamadas cromátidas, enlazadas en una sola unidad. La compactación del ADN es esencial, habida cuenta de la extrema longitud y finura de las cadenas; en un estado sin condensar resultaría imposible desenmarañarlas al intentar segregar las cromátidas.

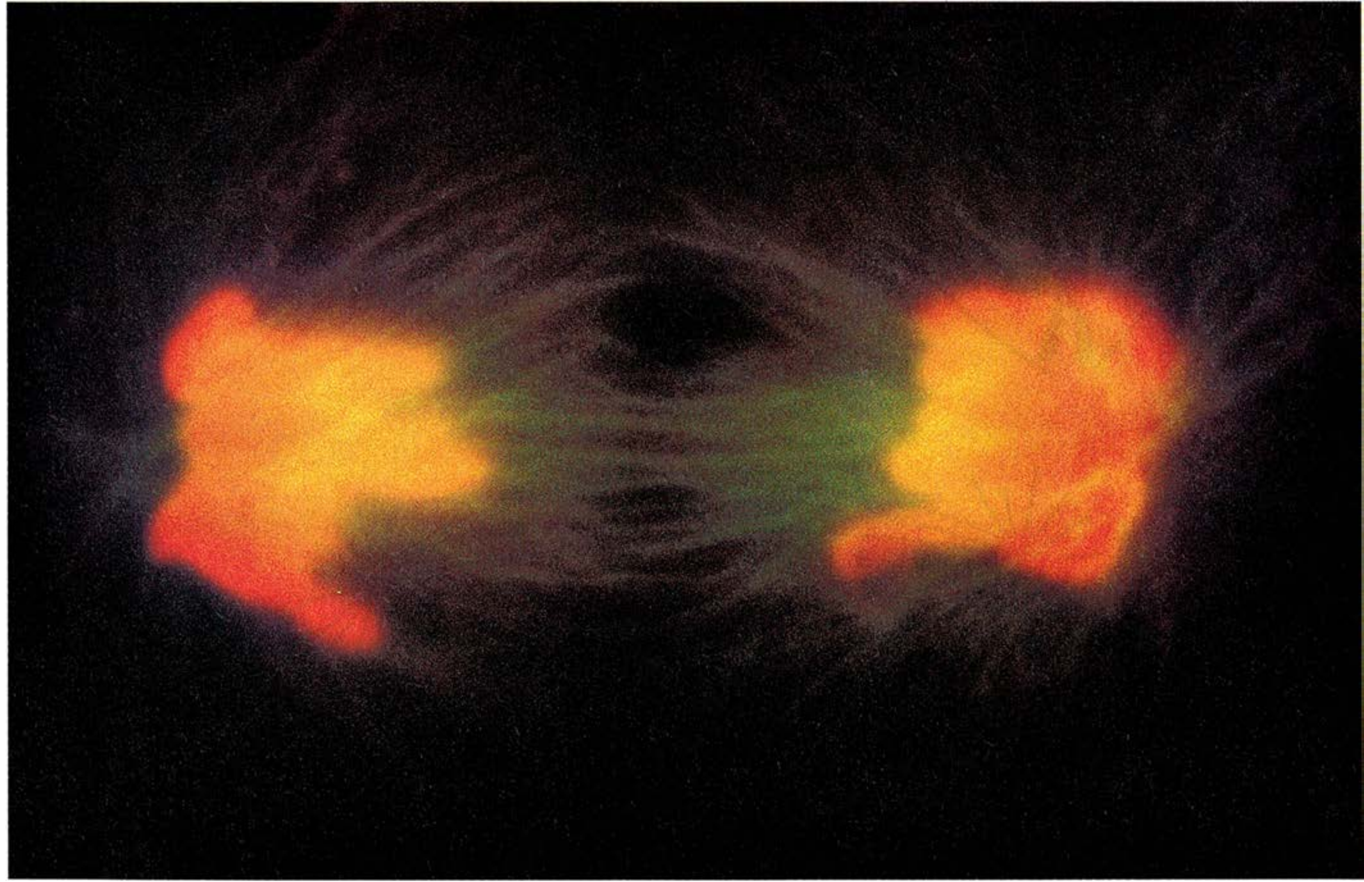
Hacia el final de la profase, el huso empieza a adquirir forma. Comienzan a constituirlo fibras que se extienden desde dos regiones especializadas extranucleares: los centrosomas. Durante el siguiente estadio —prometafase— las fibras interaccionan con los cromosomas, debido, por lo común, a la desintegración de la membrana que envuelve al núcleo.

En un principio, los cromosomas se hallan dispersos por toda la región nuclear. Sin embargo, una vez conectados con las fibras que emanan de cada centrosoma, aquéllos se ven arrastrados hacia el ecuador del huso, el plano que se encuentra en medio de los dos centrosomas. En pocos minutos, los cromosomas se alinean en torno al plano ecuatorial, en cuyo momento se dice que la célula se encuentra en metafase.

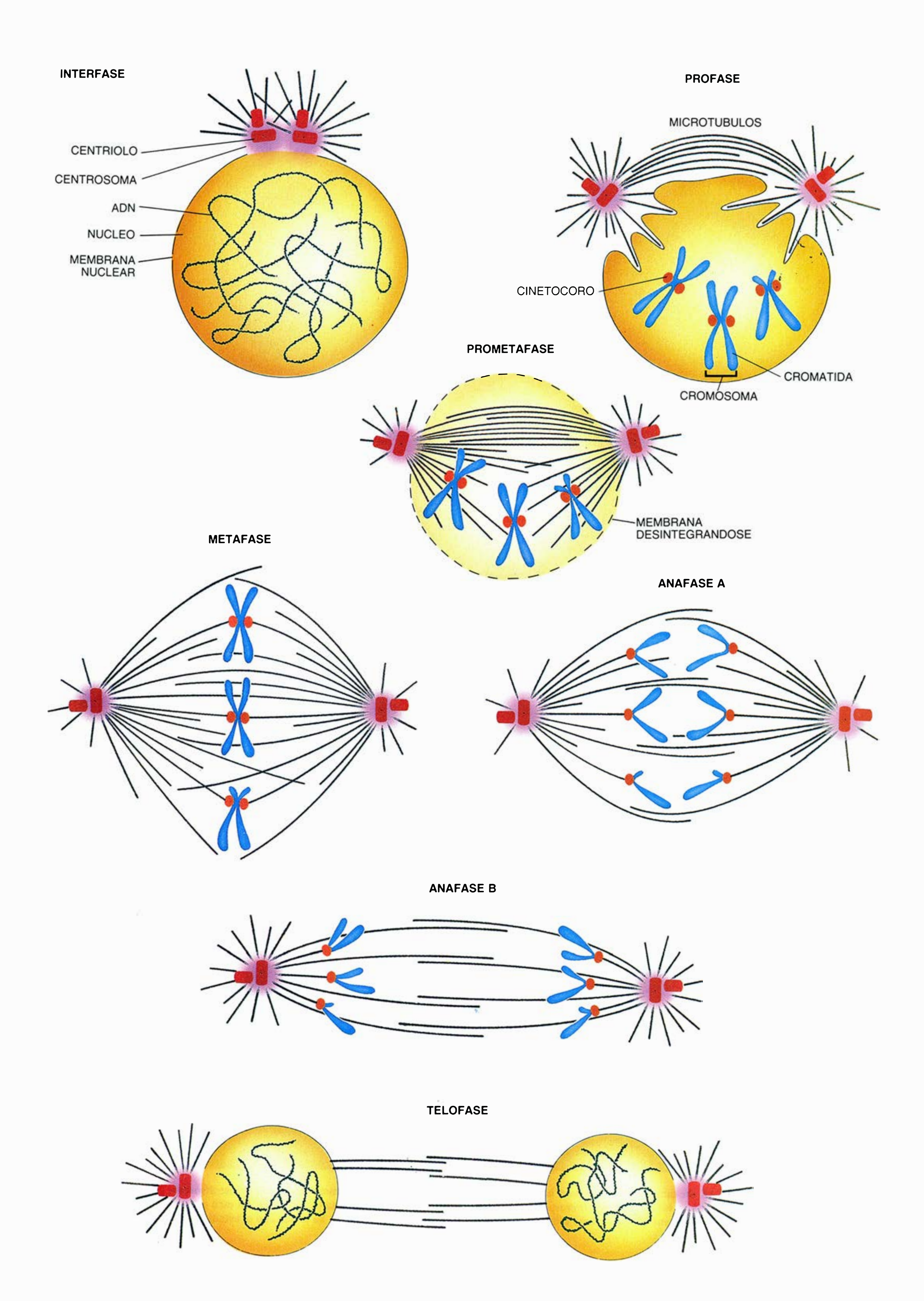
Poco después de que los cromosomas lleguen al plano ecuatorial, las cromátidas hermanas se separan, convirtiéndose en cromosomas independientes, suceso que inicia el cuarto estadio, la anafase. Los cromosomas disociados emigran, ahora, hacia sus respectivos centrosomas, que yacen en los polos opuestos del huso. Además, en este estadio el huso se alarga, aumentando la distancia entre los centrosomas y, por consiguiente, la distancia entre los cromosomas separados.

Avanzada la anafase, una nueva membrana nuclear empieza a formarse alrededor de cada uno de los dos grupos de cromosomas: empieza el último estadio, la telofase. Durante ésta, los dos juegos de cromosomas relajan su

J. RICHARD McINTOSH y KENT L. McDONALD comparten desde hace mucho tiempo un mismo interés por el huso mitótico. McIntosh es catedrático de biología molecular, celular y del desarrollo en la Universidad de Colorado en Boulder. McDonald es un investigador asociado en el laboratorio de microscopia electrónica de alto voltaje en el mismo centro superior.



1. DOS CELULAS MITOTICAS de canguro donde se han hecho visibles, por tinción, las fibras del huso (*verde*) y los cromosomas (*naranja-rojo*) unidos a cada huso. Una célula (*arriba*) se encuentra en el estadio mitótico conocido por metafase: sus cromosomas, inicialmente dispersos por todo el núcleo, están alineados en el ecuador del huso. La otra célula, con dos juegos diferenciados de cromosomas, ha alcanzado el estadio siguiente, la anafase (*abajo*).


INTERFASE
CENTRIOLO
CENTROSOMA
ADN
NUCLEO
MEMBRANA
NUCLEAR
PROFASE
MICROTUBULOS
CINETOCORO
CROMATIDA
CROMOSOMA
PROMETAFASE
MEMBRANA
DESINTEGRANDOSE
METAFASE
ANAFASE A
ANAFASE B
TELOFASE

condensación y originan un núcleo interfásico funcional. Una vez bien separadas las dos masas cromosómicas, se produce la citocinesis: el citoplasma empieza a dividirse y cada núcleo, junto con el material que lo rodea, se divide en una célula independiente.

Esta descripción ofrece una visión práctica de la mitosis y refleja más o menos el estado de los conocimientos de los años cincuenta. Sin embargo, estos conocimientos se consideran superficiales para cualquiera que esté interesado en conocer cómo una célula segrega exactamente sus cromosomas. Para responder a esta pregunta se debe profundizar en los mecanismos de acción del propio huso —una cuestión científica de primer orden que está sujeta a estudio desde el punto de vista estructural, bioquímico y genético, entre otros.

La mayor parte de nuestro trabajo se centra en la estructura; para los autores, el huso es una máquina que permite el movimiento de los cromosomas. Al objeto de entender cómo funciona una máquina, primero se ha de conocer su naturaleza y el comportamiento de sus partes móviles. Esta perspectiva nos ha ofrecido recientemente valiosos resultados sobre la arquitectura del huso y sobre el proceso de cambio de la estructura a medida que avanza la mitosis. Vamos, pues, a revisar algunas de las características básicas de la constitución del huso antes de volver a los estadios específicos de la mitosis y examinar cómo se desarrolla cada uno de ellos.

El huso está compuesto por varios elementos. El principal, las fibras, son microtúbulos: polímeros constituidos a partir de subunidades de proteínas que constan de dos moléculas estrechamente relacionadas, la alfa y la beta-tubulina. Los microtúbulos cumplen diferentes funciones en las células. Así, ayudan a definir la morfología de la célula y forman el esqueleto de los cilios, que son los que promueven la motilidad celular [véase "Microtúbulos", de Pierre Dustin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1980].

Una propiedad de los microtúbulos que resulta decisiva para su funcionamiento es la polaridad, o asimetría, que exhiben a lo largo de su superficie y en ambos extremos. Esta polaridad deriva del hecho de que las subunidades, asimétricas a su vez, están ordenadas cabeza-cola a lo largo del polímero. Como resultado, los polímeros pueden compararse con flechas largas, compuestas por flechas pequeñas (las subunidades) apuntando, todas ellas, en la misma dirección.

Esta asimetría implica, como mínimo, dos consecuencias funcionales, cuya importancia se describe a continuación: la polaridad en los extremos determina que uno —llamado extremo más (+)— añada y pierda subunidades con mayor celeridad que el otro extremo: el menos (−); la polaridad a lo largo de la superficie influye en la orientación con que las proteínas se unirán a la superficie microtubular.

Se sabe que las proteínas que se unen a los microtúbulos forman parte integral del huso mitótico, aunque no se ha identificado todavía su papel específico en la mitosis. En los cilios y muchas otras máquinas biológicas basadas en microtúbulos, la unión de proteínas al microtúbulo incluye no sólo moléculas estructurales, sino también las moléculas motor, enzimas que convierten la energía química en trabajo mecánico. Parece ser que esto también es cierto para el huso.

Los centrosomas son otra parte importante del huso. Difieren considerablemente en su estructura de un organismo a otro, pero todos comparten varias propiedades. Al principio de la interfase, cuando cada célula posee sólo un centrosoma, éste es el centro organizador de microtúbulos más importante de la célula. Sirve de núcleo para iniciar la polimerización de microtúbulos e influye en la organización de los grupos de microtúbulos resultantes, a la vez que define su polaridad. El centrosoma se replica antes de la mitosis, generalmente cuando los cromosomas se están replicando. Al principio, los centrosomas hermanos se mantienen próximos y funcionan como una sola unidad. Generalmente, se separan durante la profase, cuando se empieza a iniciar un incremento del número de microtúbulos, muchos de los cuales serán las fibras del huso mitótico.

Aunque los cromosomas no forman, por sí mismos, parte del huso propiamente dicho, cada cromátida mitótica posee una región rica en proteínas: el cinetocoro, un componente importante del huso. Todos los cinetocoros cumplen una función de acoplamiento que permite a las fibras del huso interaccionar con los cromosomas; inmediatamente después de producirse la unión de los microtúbulos y el cinetocoro, el cromosoma asociado empieza a moverse.

Con estos componentes definidos, es posible determinar su organización con el microscopio electrónico. Por ejemplo, Bill R. Brinkley, entonces en el Hospital M. D. Anderson de Houston, y otros científicos mostraron que hay dos clases principales de microtúbulos en el huso. Los llamados microtúbulos cinetocóricos tienen un extremo anclado en el cinetocoro; generalmente, pero no siempre, su extremo opuesto está en el centrosoma, o en su vecindad. De manera característica, crecen de 15 a 35 microtúbulos desde el centrosoma y se unen a cada cinetocoro.

Sin embargo, la mayoría de microtúbulos no interaccionan con los cromosomas. Estudios que hemos realizado en fragmentos de husos de mamíferos y trabajos efectuados en colaboración con otros laboratorios del huso pequeño y bien ordenado de una variedad de microorganismos han mostrado que los microtúbulos no cinetocóricos poseen un extremo en el centrosoma y libre el otro extremo; este segundo extremo se extiende hacia el otro centrosoma.

En colaboración con Jeremy D. Pickett-Heaps y David H. Tippit, en Boulder, y con Urs-Peter Roos, de la Universidad de Zurich, hemos seccionado los husos en cortes finos, fotografiado los cortes secuencialmente en el microscopio electrónico, y registrado, mediante ordenador, la localización de cada microtúbulo en cada sección. Este enfoque nos ha permitido seguir la trayectoria individual de cada microtúbulo y localizar sus extremos. Gracias a ello, conocemos valiosos detalles rela-

2. ORGANIZACION Y SEGREGACION de los cromosomas durante la mitosis. Implican muchos pasos. La célula actúa de soporte durante la interfase, el período entre las divisiones celulares. En la interfase, el ADN del núcleo se replica, como también lo hace un cuerpo no nuclear conocido como centrosoma, que en los animales consiste en dos estructuras cilíndricas llamadas centríolos, rodeadas por una matriz. El centrosoma inicia el crecimiento de los microtúbulos, los cuales se convierten en las fibras del huso durante la mitosis. En el primer estadio mitótico —la profase— el ADN replicado se condensa para formar los distintos cromosomas, compuestos por dos cromátidas idénticas enlazadas. Además, los centrosomas se separan y las nuevas fibras del huso que emergen deforman la membrana nuclear. La membrana se desintegra en la prometafase y las cromátidas se unen a las fibras del huso en una región especial: el cinetocoro. Una vez unidos a ambos centrosomas, los cromosomas se dirigen hacia el ecuador del huso, donde terminarán por formar la llamada orientación metafásica. Seguidamente, las cromátidas enlazadas se separan, convirtiéndose en cromosomas independientes e iniciando la anafase, un estadio que consta de dos partes. En la primera, cada cromosoma se acerca al centrosoma al cual está unido. El huso se alarga, dilatando la distancia entre los cromosomas. Al final, se forma una membrana nuclear alrededor de cada uno de los dos grupos de ADN, señal de que la célula entra en el estadio telofásico.

tivos a la longitud y función de las fibras no cinetocóricas.

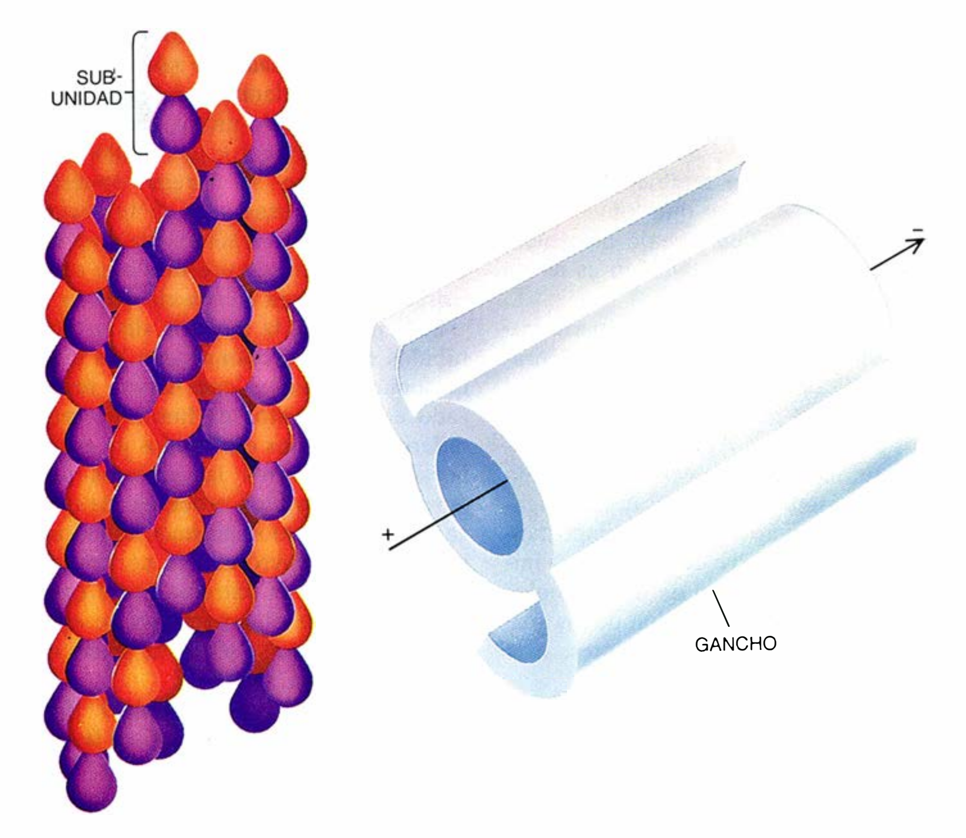
En particular, hemos descubierto que algunos de los microtúbulos no cinetocóricos son cortos, pero otros poseen longitud suficiente para entrelazarse con microtúbulos no cinetocóricos del lado opuesto del huso. Durante la prometafase y metafase sobre todo, muchos de los microtúbulos entrelazados se extienden una distancia considerable hacia el centrosoma opuesto, formando una estructura que sirve para mantener a los dos centrosomas separados en los polos del huso. Algunos microtúbulos, pocos, tienen sus dos extremos libres; se desconoce qué función desempeña en el proceso mitótico. (El huso de muchas células animales incluye también los microtúbulos del áster, que se proyectan fuera del centrosoma hacia la periferia celular; carecen de misión manifiesta en la segregación de los cromosomas, pero intervienen en la citocinesis.)

Incluso después de haber adquirido este nivel de conocimientos de la estructura, seguíamos ignorando la orientación polar de las diferentes clases de microtúbulos del huso. Esta información era necesaria, por cuanto nos habría de proporcionar indicios sobre cómo se forma el huso; también ayudaría a limitar el conjunto de posibles explicaciones de varios de los procesos de la mitosis.

Para entender mejor el alcance de estas últimas afirmaciones, debemos recordar que la polaridad de los microtúbulos influye en la orientación de la unión de proteínas, incluida probablemente la unión de las moléculas motor. La orientación condiciona, a su vez, la dirección en la cual algunas moléculas motor viajan a lo largo del microtúbulo; también se puede esperar que influya en la fuerza ejercida por la molécula motor en el propio microtúbulo o en otros cuerpos donde dicha molécula pueda unirse, como un cromosoma o un microtúbulo cercano. Por tanto, en principio, conociendo dónde están localizados los extremos positivos de los microtúbulos cinetocóricos, podría determinarse si una molécula motor que se sabe se mueve en la dirección más-menos se halla o no implicada en el movimiento de los cromosomas hacia el centrosoma durante la prometafase o anafase, así como otras cuestiones de parejo tenor.

La polaridad de los microtúbulos no es visible en los microscopios ópticos tradicionales, ni en los electrónicos. Ahora bien, en los primeros años de la década de los ochenta Steven R. Heidemann y Ursula Euteneuer, en Boulder, y Leah T. Haimo y Bruce R. Telzer, en el laboratorio de Joel L. Rosenbaum, de la Universidad de Yale, desarrollaron métodos para visualizar esta polaridad. Sus estudios corroboran que todos los microtúbulos del huso, incluyendo los que se hallan unidos a los cinetocoros, están orientados con sus extremos más (de crecimiento rápido) dirigidos hacia fuera de los centrosomas, con los que se encuentran conectados.

Marc W. Kirschner y Timothy J. Mitchison, de la Universidad de California en San Francisco, acaban de agrupar gran cantidad de hallazgos estructurales y datos sobre la polimerización de los microtúbulos en un potente modelo sobre la formación del huso. Sugieren que, durante la mitosis, los microtúbulos están continuamente iniciándose en los centrosomas y creciendo por adición de subunidades sólo en sus extremos más (los extremos distantes del centrosoma). Se sabe que los microtúbulos crecen durante un tiempo a una velocidad constante para cambiar a un estado en el cual se desensamblan rápidamente; a ese fenómeno Mitchison y Kirschner lo denominan de inestabilidad dinámica. En consecuencia, muchos microtúbulos desaparecen en cuanto se forman. Otros, sin embargo, se estabilizan y sobreviven el tiempo suficiente para construir el huso y llevar a cabo sus funciones. Esta subpoblación se estabiliza, bien por unirse al cinetocoro (en el caso de las fibras cinetocóricas) o bien interaccionando con microtúbulos del polo opuesto (en el caso de las fibras entrelazadas).



3. POR MICROTUBULO se entiende un polímero no elástico, tubiforme, construido a partir de subunidades de la proteína tubulina (*izquierda*). Las subunidades de tubulina están formadas, a su vez, por dos moléculas proteicas distintas: alfa- y beta-tubulina (aquí representadas por diferentes colores). Las subunidades están siempre alineadas de cabeza a cola; por eso, los microtúbulos son polares: sus extremos difieren estructural y funcionalmente. Un extremo, el llamado extremo +, gana y pierde subunidades más rápidamente que el otro extremo (−). Los investigadores pueden distinguir los extremos (+) y (−) por varios métodos. Por ejemplo, pueden inducir a los microtúbulos a "germinar" en láminas en forma de gancho de tubulina (*derecha*). Si los ganchos se curvan, en sentido horario, como lo estaban en el microtúbulo original, el observador ve el microtúbulo desde el extremo + hacia el extremo −.

Estamos ya en condiciones de retomar nuestra anterior descripción de la mitosis e imaginar de qué manera el huso controla la segregación de los cromosomas durante la mitosis. Retornemos al proceso mitótico, al punto donde los microtúbulos empiezan a interaccionar con los cinetocoros, esto es, al principio de la prometafase.

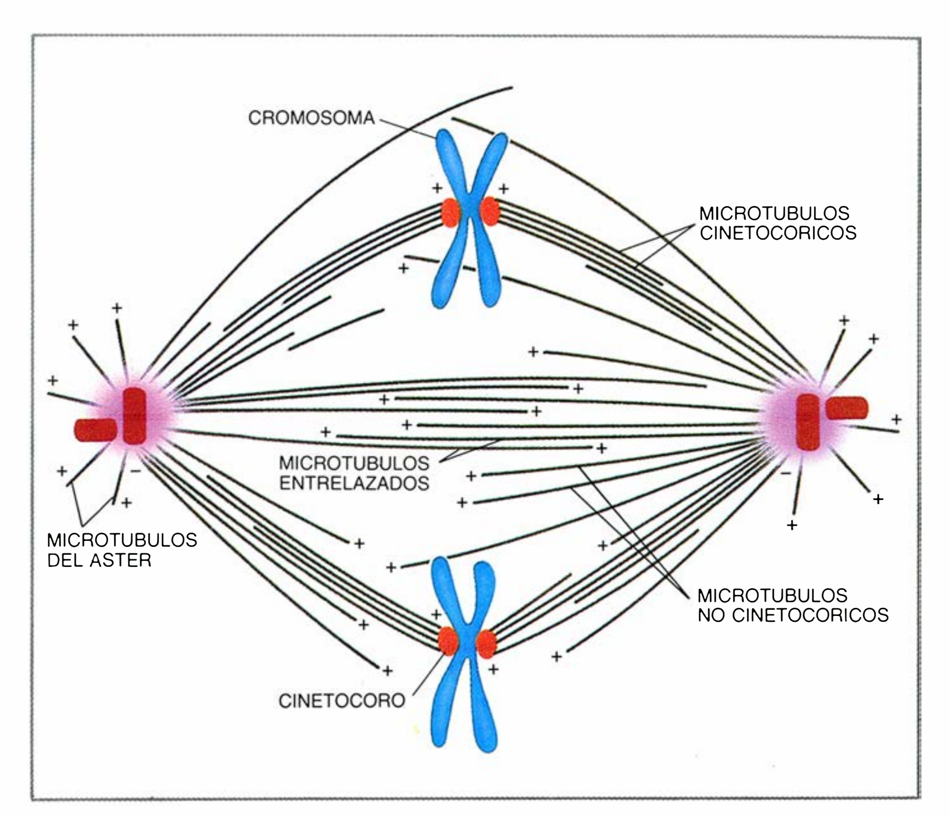
Tan pronto como un microtúbulo se une al cinetocoro, el cromosoma adherido (constituido todavía por cromátidas unidas) empieza a avanzar ha-

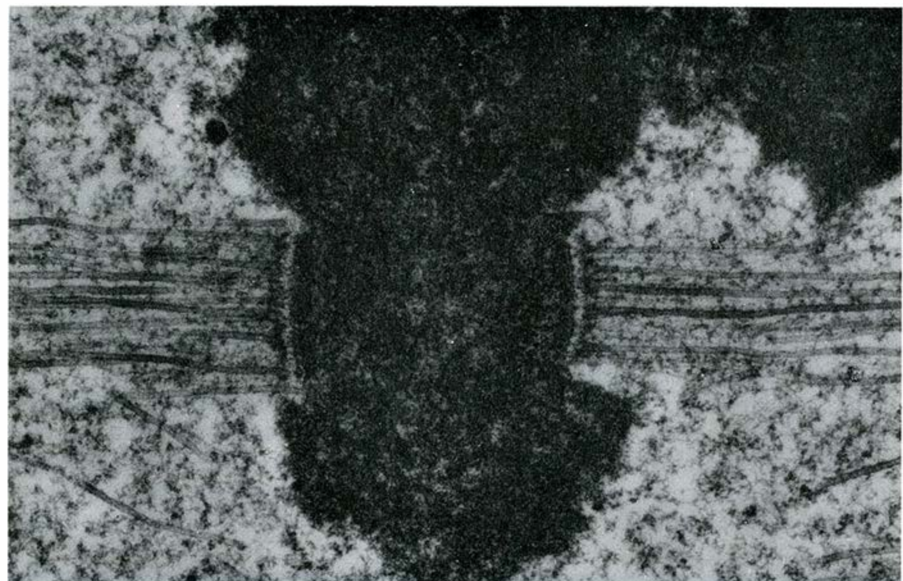
cia el centrosoma con el cual está ahora ligado. Este movimiento puede obedecer a una fuerza ejercida por un cinetocoro activo en un microtúbulo estático o bien deberse al acortamiento de un microtúbulo unido a un cromosoma esencialmente pasivo.

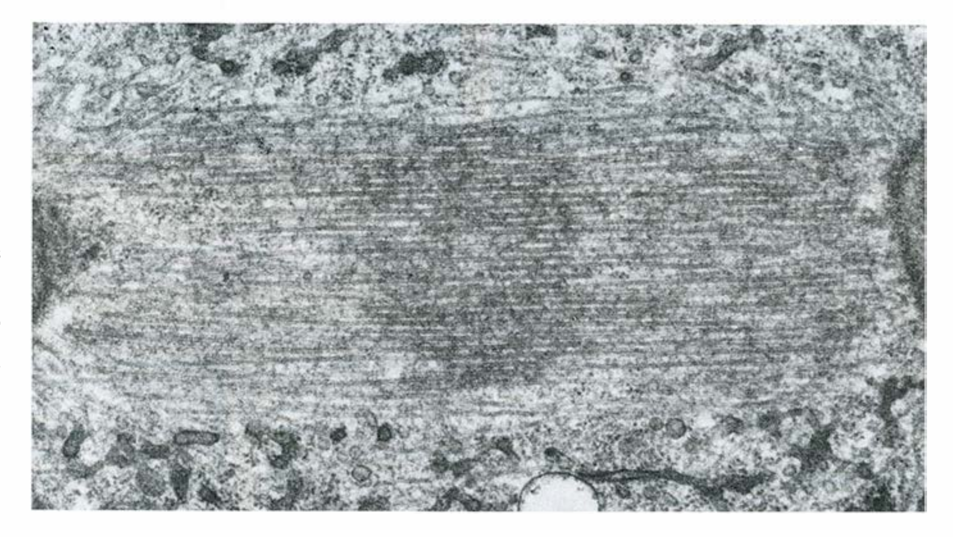
El cromosoma no se mantiene cerca del centrosoma mucho tiempo; sin embargo, en el momento en que el cinetocoro hermano se une a una o más fibras del cromosoma opuesto, dicho cromosoma es tirado hacia adelante y hacia atrás por los dos centrosomas opuestos. Los forcejeos terminan por conducir los cromosomas hacia el ecuador del huso, donde pasan a formar parte del ordenamiento metafásico. En la metafase los cromosomas están ordenados, de manera que cada cinetocoro se sitúa frente al centrosoma con el cual está unido.

Aunque muchos mecanismos de la prometafase se conocen sólo de manera muy superficial, aquel en virtud del cual la célula asegura que los dos cinetocoros de cada cromosoma estén conectados a los centrosomas opuestos se ha dilucidado ya en parte. R. Bruce Nicklas y Donna F. Kubai, de la Universidad de Duke, han mostrado que los cinetocoros pueden asociarse en un comienzo con microtúbulos procedentes de casi cualquier dirección, por más que las asociaciones sean al principio débiles. Una vez establecida la unión bipolar, la asociación del cromosoma con el huso se vuelve firme.

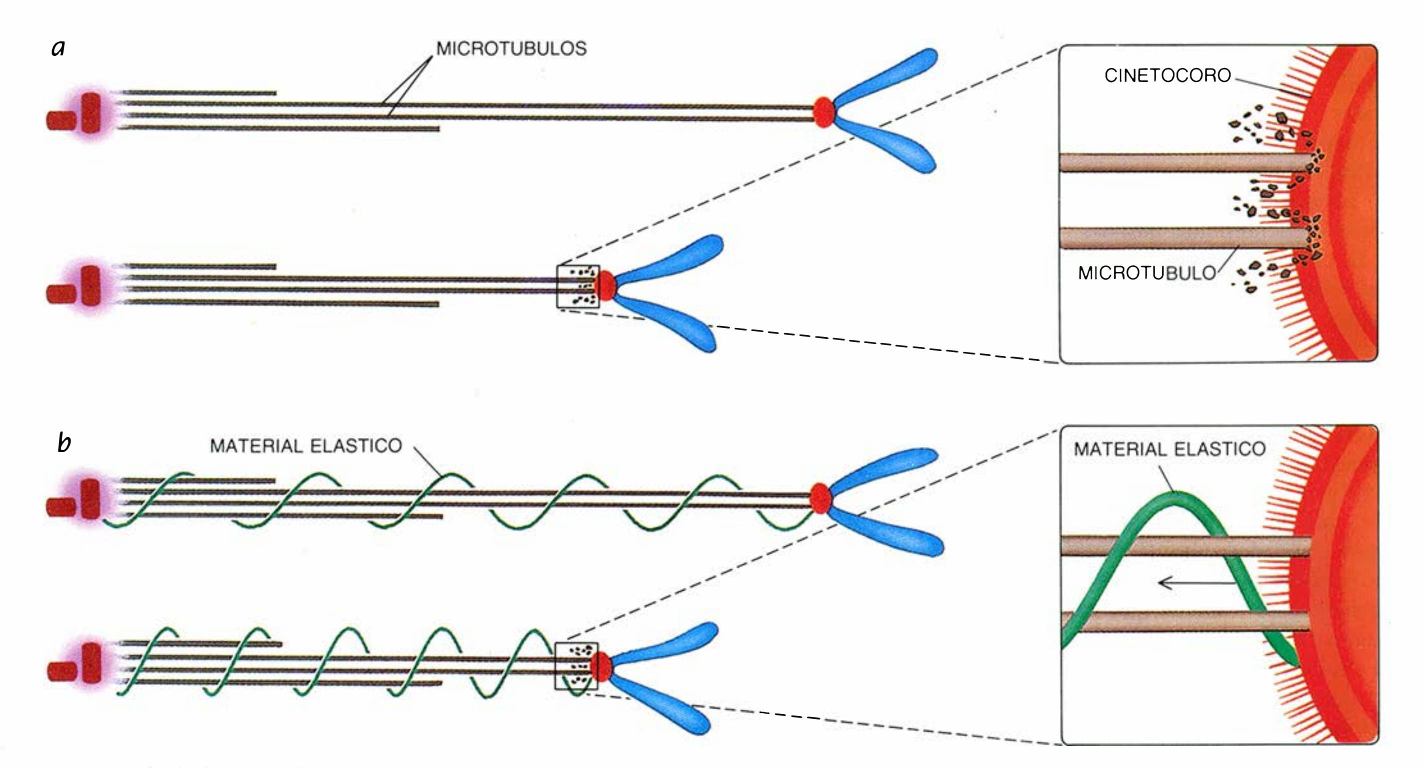
El trabajo de Nicklas sugiere que la estabilidad de la unión de los cromosomas al huso se origina por la tensión ejercida cuando los cinetocoros hermanos de un cromosoma determinado







4. HUSO TERMINADO de una célula animal típica en el estadio de metafase; comprende diferentes categorías de microtúbulos, clasificados según donde terminen sus extremos (*arriba*). Hay dos clases principales. Abarca la primera los microtúbulos que tienen un extremo unido al cinetocoro; muchos de los microtúbulos cinetocóricos, aunque no todos, están también unidos en su extremo opuesto al centrosoma. Generalmente, la mayoría de microtúbulos se unen al mismo cinetocoro, como se evidencia en la micrografía electrónica superior, tomada por Matthew J. Schibler, de La Jolla Cancer Research Foundation. La otra clase principal consiste en microtúbulos que crecen desde el centrosoma y no se unen al cinetocoro. Estas fibras no cinetocóricas incluyen microtúbulos que se entrelazan en el ecuador del huso, así como fibras cortas y algunas que se mantienen flotando con libertad. Los microtúbulos no cinetocóricos de algunos microorganismos se hallan especialmente bien ordenados, como se pone de manifiesto en la micrografía inferior. Muchos husos de animales poseen microtúbulos "áster" dispuestos en orientación radial. Los extremos de rápido crecimiento (+) de los microtúbulos del huso se sitúan lejos del centrosoma que inició los microtúbulos.

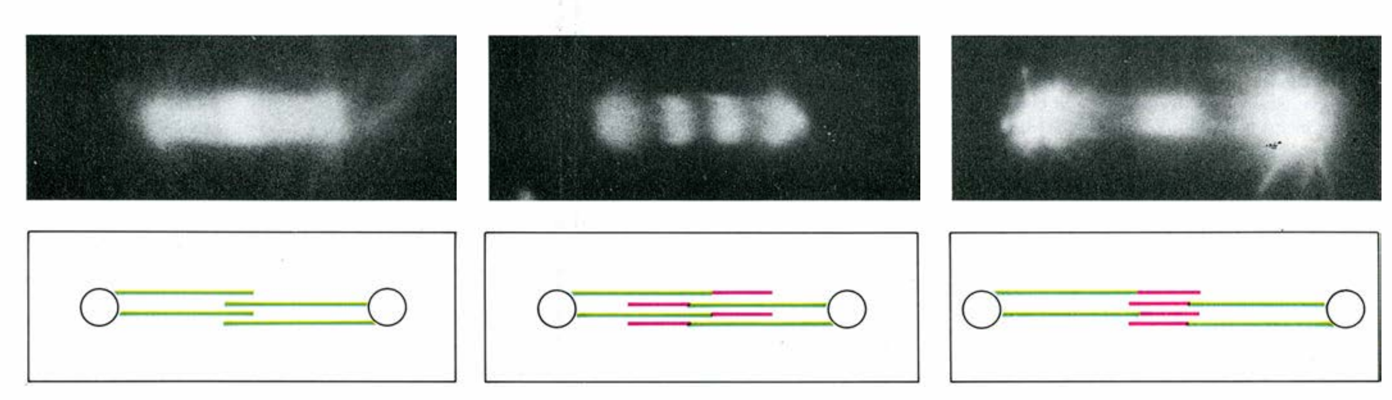


5. SE MUEVE EN EL TERRENO DE LA HIPOTESIS el proceso en cuya virtud los cromosomas emigran hacia los centrosomas (los polos del huso) durante la anafase A. Se supuso en un comienzo que los cromosomas se movían tirados por los microtúbulos cinetocóricos a medida que dichos microtúbulos se acortaban en su extremo centrosómico. En realidad, los microtúbulos pierden subunidades de su extremo cinetocórico. Un cinetocoro podría desensamblar activamente microtúbulos unidos y después agarrarse sucesivamente a las partes restantes de uno o más microtúbulos acortados como si las fibras fueran cuerdas salvavidas (*a*). Cabría también que una substancia elástica, no identificada todavía, se encontrara enlazada entre el cinetocoro y el polo, en cuyo caso los microtúbulos podrían amortiguar el efecto de estiramiento sobre los cromosomas, realizado por dicha substancia elástica (*b*). La despolimerización de los microtúbulos permitiría entonces que la substancia elástica estirase el material genético en dirección hacia los polos.

son estirados en direcciones opuestas. Si los cinetocoros hermanos de un cromosoma prometafásico quedan unidos por microtúbulos al mismo centrosoma, el cromosoma se liberará espontáneamente del huso. Pero, si se inserta una microaguja en este cromosoma y se tira hasta ejercer la tensión normal ejercida por los microtúbulos del centrosoma opuesto, el cromosoma no se desliga del huso. Importa recordar que sus dos cinetocoros permanecen unidos al centrosoma en cuestión durante el tiempo que el experimentador mantiene la tensión o hasta que la célula entra en la anafase. El hecho de que la unión de los cromosomas al huso sea estable sólo bajo "tensión" ayuda a asegurar que cada cromátida de un par emigrará hacia cada polo del huso mitótico.

La célula generalmente alcanza estabilidad, unión bipolar de los cromosomas al huso, mucho antes de que todos los cromosomas se congreguen en el plano ecuatorial del huso durante el ordenamiento metafásico. ¿Cómo consiguen, entonces, las fibras cinetocóricas unidas al centrosoma opuesto llevar el cromosoma hasta el plano ecuatorial del huso?

Gunnar Östergren, de la Universidad de Uppsala en Suecia, propuso a principios de los años cincuenta que la célula podía regular la magnitud de las fuerzas que actuaran en el cinetocoro de forma que la fuerza neta sería proporcional a la longitud de las fibras unidas al cinetocoro. La idea es atractiva,

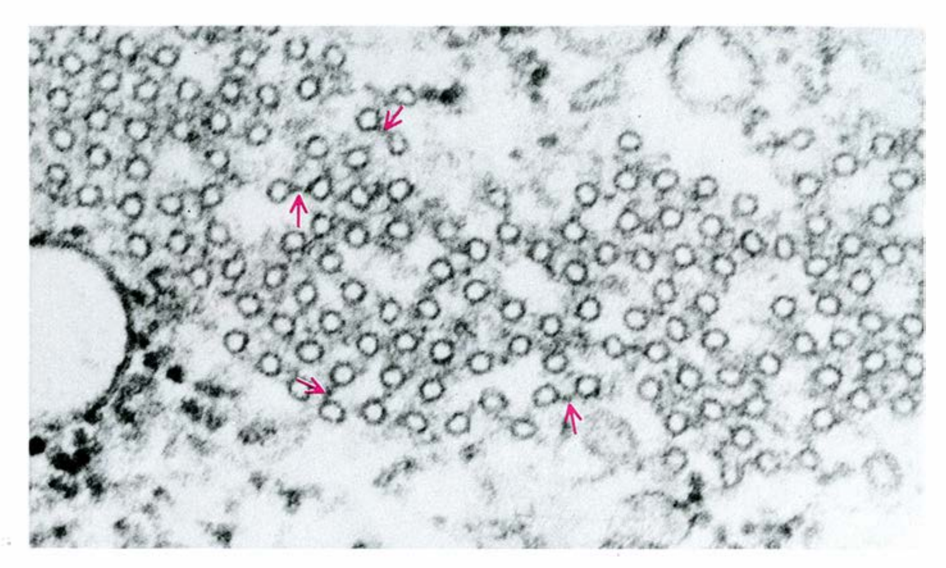


6. SE CREE QUE LA ELONGACION DEL HUSO, durante la anafase B, se consigue mediante el crecimiento de microtúbulos entrelazados en los extremos + y mediante subsiguientes deslizamientos de las fibras alargadas. Hirohisa Masuda y W. Zacheus Cande han obtenido resultados que confirman ambos procesos. En primer lugar tiñeron los microtúbulos nativos de un huso aislado con una tinción fluorescente (*arriba a la izquierda y esquema inferior*); la tinción es más intensa en el centro porque las fibras entrelazadas se solapan en dicha zona. Después, añadieron tubulina marcada con una tinción diferente. Una microfotografía (*centro*) muestra sólo a la nueva tubulina incorporada (*rojo en los esquemas*) revelando un incremento del solapamiento, que indica que las fibras crecen al adicionar la tubulina en sus extremos positivos. (Los microtúbulos del áster también se tiñen, pero tal efecto es irrelevante con respecto a la elongación del huso.) Agregan luego ATP, el combustible necesario para la elongación del huso (*derecha*). La zona de solapamiento se reduce y el conjunto del huso se alarga, resultados que pueden ser explicados sólo por el deslizamiento de los extremos marcados.

en parte porque está de acuerdo con los hallazgos según los cuales los microtúbulos cinetocóricos largos se acortan durante la prometafase y se alargan las fibras cortas provenientes del centrosoma opuesto, hasta que la longitud de las fibras acaba por igualarse.

Algunos resultados obtenidos por Thomas S. Hays y Dwayne A. Wise, en el laboratorio de Edward D. Salmon en la Universidad de North Carolina en Chapel Hill, corroboran la hipótesis de Östergren. Además, Hays ha ampliado el trabajo, mostrando que la magnitud de la fuerza de tracción es también proporcional al número de microtúbulos unidos al cinetocoro. Cuantos más microtúbulos están asociados mayor es la fuerza.

¿Qué agente realiza el estiramiento y en virtud de qué mecanismo se halla relacionada la magnitud de la fuerza con la longitud de las fibras del cinetocoro? Cabe la posibilidad de que los microtúbulos produzcan el estiramiento en respuesta ante las fuerzas ejercidas sobre ellos por las proteínas motor unidas a las fibras; un número de fibras mayor, y más largas, ejercerá una fuerza mayor que un número menor de fibras y más cortas, ya que las primeras pueden unirse a más proteínas productoras de fuerza. Sin embargo, hay otras explicaciones lógicas. También nos gustaría conocer qué es lo que controla el ensamblaje y desensamblaje de los microtúbulos cinetocóricos, cuando los cromosomas se mueven hacia el ecuador del huso.



7. MICROTUBULOS INTERDIGITANTES (*círculos pequeños*), **mostrados en sección sagital. Se enlazan entre ellos en la zona de solapamiento por medio de puentes** (*indicado con flechas*). **Los puentes, que se ponen de manifiesto en las micrografías electrónicas, podrían formar parte del aparato que separa las dos mitades del huso mitótico al final de la mitosis. (Fotografía de Kent L. McDonald, uno de los autores.)**

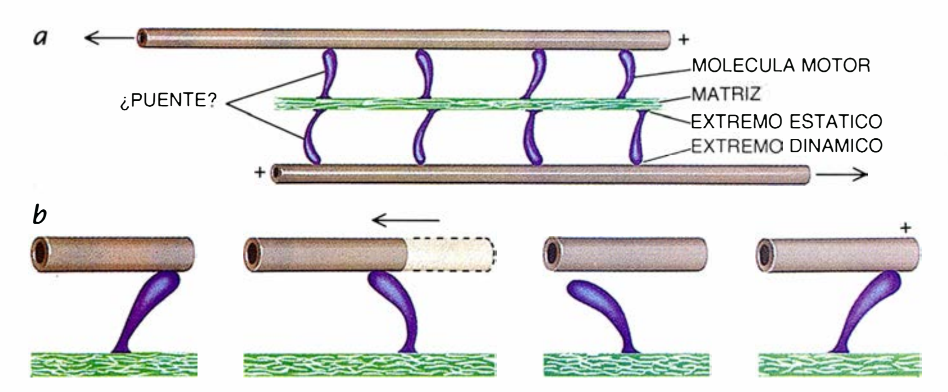
Con independencia del modo en que los cromosomas encuentren su camino hacia la posición metafásica, una vez allí sus cromátidas están en una ordenación correcta para moverse sin impedimento hacia sus respectivos polos. El ordenamiento metafásico reviste tal importancia para el proceso de segregación que, cuando un cromosoma se retrasa en situarse en el ecuador del huso, se demora también el inicio de la anafase. Diríase, pues, que existe algún mecanismo celular que controla la llegada de los cromosomas al plano ecuatorial y retrasa el inicio de la anafase hasta que todos los cromosomas retrasados toman su posición correcta.

La separación de las cromátidas hermanas, que señala el fin de la metafase y comienzo de la anafase, es un proceso mitótico que parece resultar independiente de la actividad del huso: se lleva a cabo en algunas células incluso en ausencia del huso. Algunos datos abonan la idea de que el desencadenamiento se produciría por un incremento de la concentración de los iones calcio provenientes de las vesículas unidas a la membrana en la región nuclear.

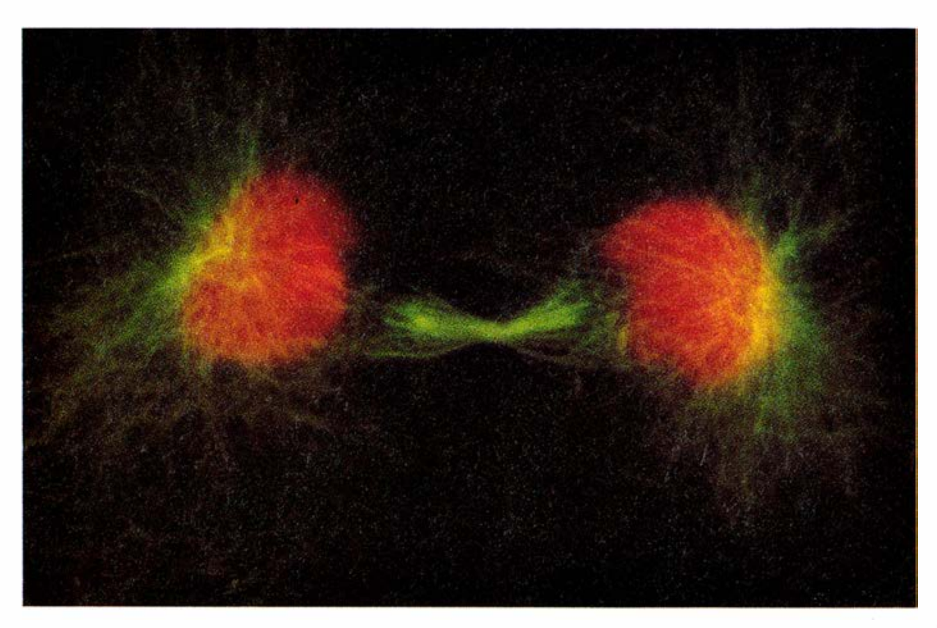
Concluida la separación de las cromátidas, la anafase prosigue en dos fases. Primero, en la llamada anafase A, los microtúbulos cinetocóricos se acortan conforme los cromosomas (las cromátidas acabadas de separar) emigran hacia sus respectivos polos. Luego, en la anafase B (que puede solaparse, hasta cierto punto, con la primera fase), el huso se alarga.

El laboratorio de Gary G. Borisy, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y los laboratorios de Kirschner y Nicklas han observado por separado que, durante la anafase A, los microtúbulos cinetocóricos se acortan por pérdida de subunidades en su extremo cinetocórico; parece que los cromosomas no se devanan pasivamente, como se había pensado, con el acortamiento de las fibras en los centrosomas. En realidad, el hecho de que los cromosomas permanezcan unidos a los microtúbulos mientras se sueltan los polímeros sugiere que los cinetocoros desarrollan bastante actividad y podrían contribuir a la disgregación de los microtúbulos.

¿Qué suerte de interacciones entre el cinetocoro y los microtúbulos cinetocóricos facultan el movimiento de los cromosomas hacia los respectivos centrosomas? Una posibilidad es que alguna entidad, quizás el propio cinetocoro, ejerza una fuerza de compresión (eliminando subunidades) en los micro-



8. DESLIZAMIENTO de microtúbulos interdigitantes en la anafase B; se consigue mediante las moléculas motor, que, así se cree, componen una matríz que ha sido identificada en la zona de solapamiento de los microtúbulos. El modelo que aquí se muestra (*a*) sugiere que las moléculas motor entran en contacto con los microtúbulos y empujan las fibras hacia la periferia de la célula (en la dirección más-menos). Esto es (*en detalle, de izquierda a derecha, b*) se supone que los motores se adhieren a la superficie microtubular, empujan las fibras hacia los polos, se despegan de la superficie y se vuelven a adherir al microtúbulo en una posición cercana al extremo (+). En las micrografías electrónicas, dos moléculas motor relativamente próximas y en acción sobre microtúbulos de polos opuestos parecen un solo puente.



9. CELULAS DE CANGURO en telofase. Están constituidas por dos núcleos completos en el proceso de retorno a la condición de interfase; tan sólo las fibras del huso (*verde*) y el ADN (*rojo*) son visibles. La célula ha concluido, casi, la división citoplasmática. La barra fluorescente de microtúbulos, que se aprecia en el centro de la imagen, está en el istmo que todavía conecta a las células hermanas.

túbulos; y ello quizás en virtud de la tensión ejercida por las moléculas motor que están unidas a los cinetocoros y que conducen a los microtúbulos hacia el extremo del centrosoma. Los cromosomas se quedarían entonces unidos a los grupos de microtúbulos acortados agarrándose en las partes restantes de uno o más microtúbulos, como si se tratase de un salvavidas. Si el cinetocoro posee la actividad que le atribuye el modelo y ejerce fuerzas sobre los microtúbulos durante la anafase, estos hallazgos indicarían que antes —en la prometafase— el cinetocoro podría también intervenir en el movimiento de los cromosomas, promoviendo el impulso de éstos hacia el ecuador del huso.

De acuerdo con otra explicación alternativa sobre el movimiento de los cromosomas en la anafase, algún tipo de componente elástico ejercería una fuerza de tracción entre el cinetocoro y el polo, y el microtúbulo cinetocórico se limitaría a refrenar dicho movimiento tractor. Al acortarse el microtúbulo, permitiría que las fuerzas elásticas tirasen de los cromosomas hacia los polos. Pero no se tiene ninguna seguridad de que exista tal sistema elástico.

Se conoce mejor el mecanismo por el cual los polos del huso y los cromosomas unidos se separan y progresan hacia la periferia durante la anafase B. Se sabe que, como mínimo en algunos organismos, las fibras entrelazadas se alargan en su extremo positivo (alejado del centrosoma); entonces, las moléculas motor del plano ecuatorial del huso, donde los microtúbulos entrelazados se solapan, empujan las fibras del centrosoma opuesto lejos una de otra, de forma que las fibras se deslizan hacia los polos opuestos. Este movimiento obliga a los centrosomas (y, por tanto, a las cromátidas unidas a ellos) a distanciarse bastante.

Intuimos por primera vez que podría existir un mecanismo deslizante cuando estábamos realizando análisis de microscopía electrónica sobre la estructura del huso en los años setenta con Pickett-Heaps y Tippit. Mientras observábamos la estructura de los microtúbulos no cinetocóricos, advertimos que los microtúbulos del huso de los polos opuestos parecían haberse deslizado entre el final de la anafase A y el final de la anafase B. Descubrimos comportamientos similares en husos de células de mamíferos, en diatomeas (algas planctónicas) y en el moho *Dictyostelium discoideum*. En cada caso, hallamos también que los microtúbulos estrelazados habían incrementado su longitud durante la anafase B.

La conclusión de que el mecanismo generador de fuerza para la elongación del huso reside en el propio huso se apoya, en buena medida, en el trabajo realizado a mediados de los ochenta por W. Zacheus Cande y colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley. Estos investigadores aislaron husos de células de diatomeas y añadieron trifosfato de adenosina (ATP), un combustible biológico; con ello, las dos mitades del huso (cada una constaba de un centrosoma y sus fibras asociadas) se deslizaban por separado. Si el huso no contuviera sus propias fuerzas de deslizamiento, la adición de ATP no tendría ningún efecto.

En el laboratorio de Cande, Linda Wordeman mostró además que las proteínas alojadas en la zona de solapamiento tenían que activarse mediante la unión de un grupo fosfato del ATP para que el huso se alargara. Cande y su colega Hirohisa Masuda añadieron otra pieza al proceso de la anafase B y mostraron que la elongación de los microtúbulos entrelazadores en las diatomeas ocurría por adición de subunidades en el extremo positivo (alejado del centrosoma).

¿Por qué las fibras entrelazadas se alargan mientras que, al mismo tiempo, se va soltando el resto de las fibras del huso? ¿Cómo se consigue el deslizamiento? Una respuesta plausible para la primera pregunta está relacionada con el empaquetamiento, durante la anafase y por una matriz de contenido proteico, de los microtúbulos entrelazados en el área de solapamiento. Esta matriz podría muy bien conferir un ensamblaje ventajoso a las fibras. Verbigracia, las moléculas de la matriz podrían estabilizarlos, uniéndose a los microtúbulos, tal como parece realizarse en la unión del cinetocoro.

El deslizamiento de microtúbulos entrelazados, que nuestro colega William M. Saxton acaba de demostrar en células vivas de mamíferos, podría generarse de varios modos. Cierto es que todos los mecanismos propuestos se encuentran todavía a mitad de camino entre la realidad y la especulación. A tenor de uno de los modelos, los motores responsables del movimiento están anclados en la matriz de la región de solapamiento. De allí se unen a un microtúbulo y lo arrastran en la dirección más-menos. Dicha actividad empujaría a las fibras entrelazadas en direcciones opuestas, hacia la periferia de la célula. Con el microscopio electrónico se pueden observar puentes entre microtúbulos entrelazados y quizá se trate de los motores postulados [*véanse las figuras 7 y 8*].

¿Cuáles son, en resumen, las conclusiones que podemos extraer de las investigaciones realizadas acerca del funcionamiento normal del huso mitótico? Se nos ofrece como una estructura dotada de un dinamismo sorprendente. Sus microtúbulos se inician en los centrosomas y crecen luego y se desmadejan prestamente a medida que el proceso mitótico se va desarrollando. La mayor parte del crecimiento y desensamblaje se produce, así parece, en

el extremo del microtúbulo lejos del polo. Aunque todos los microtúbulos poseen la misma polaridad, las fibras se comportan de distinto modo en función de las estructuras a las cuales se unen en el huso. Si se asocian con la región de los cinetocoros de los cromosomas, entonces participan en el movimiento de los cromosomas durante la prometafase y la anafase A. Si interaccionan con microtúbulos de polos opuestos, entonces forman un haz de microtúbulos entrelazados que mantienen los polos separados. Además, mediante polimerización y deslizamiento, estas fibras entrelazadas parecen alargar el huso durante la anafase B y, por tanto, aceleran la segregación de los cromosomas.

La resolución del problema sobre el agente que controla los movimientos de los cromosomas durante el proceso mitótico dependerá fundamentalmente del conocimiento del proceso de interacción entre las distintas moléculas del huso. Bioquímicos y genéticos avanzan en esa vía y se está empeñando un gran esfuerzo para identificar los componentes moleculares del huso que son esenciales para su funcionamiento. Se han detectado dos moléculas motor asociadas a los microtúbulos en células en proceso de división. Viajan a través de los microtúbulos y ocasionan el movimiento de estructuras vecinas, al menos *in vitro*. Queda por ver si estas enzimas participan en los procesos mitóticos de las células vivas. Por el momento, cabría también la posibilidad de que los motores mitóticos que estamos buscando fueran enzimas desconocidas. Tenemos la esperanza de que se revelará la identidad de estas importantes moléculas en un futuro próximo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BEYOND SELF-ASSEMBLY: FROM MICROTUBULES TO MORPHOGENESIS. Marc Kirschner y Tim Mitchison en *Cell*, vol. 45, n.º 3, págs. 329-342; 9 de mayo de 1986.

CHANCE ENCOUNTERS AND PRECISION IN MITOSIS. R. Bruce Nicklas en *Journal of Cell Science*, vol. 89, parte 3, págs. 283-285; marzo de 1988.

CELL MOVEMENT, VOLUME 2: KINESIN, DYNEIN, AND MICROTUBULE DYNAMICS. Dirigido por Fred D. Warner y J. Richard McIntosh. Alan R. Liss, Inc., 1989.

ENZIMES FOR MICROTUBULE-DEPENDENT MOTILITY. J. Richard McIntosh y Mary E. Porter en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 264, n.º 11, págs. 6001-6004; 15 de abril de 1989.

MITOSIS: MOLECULES AND MECHANISMS. Dirigido por J. S. Hyams y B. R. Brinkley. Academic Press, Inc., 1989.

Microscopios con sonda de barrido

Estos instrumentos permiten estudiar las características de los cuerpos con un detalle inasequible a los microscopios ordinarios, examinándolos a muy corta distancia con una sonda cuyo espesor puede ser de un solo átomo

H. Kumar Wickramasinghe

Los objetos cuyas dimensiones son menores que la longitud de onda de la luz visible se han convertido en un campo fundamental de la ciencia y tecnología contemporáneas. Los biólogos estudian las moléculas de las proteínas o el ADN; los especialistas en ciencia de materiales examinan los defectos atómicos de los cristales; los ingenieros microelectrónicos construyen circuitos cuyo espesor es de escasas decenas de átomos. Hasta hace pocos años, todo ese mundo diminuto sólo podía observarse mediante métodos muy complejos y con frecuencia destructivos, tales como la microscopía electrónica y la difracción de rayos X, que alejaban ese estudio fuera del alcance de instrumentos tan sencillos y directos como los microscopios ópticos ordinarios.

Una nueva familia de microscopios abre este dominio a la observación directa. Estos dispositivos permiten cartografiar los cuerpos a escala atómica y molecular, estudiar las propiedades magnéticas y mecánicas de la materia e incluso poner de manifiesto las variaciones de temperatura con una resolución mucho mayor de la que ha sido posible hasta la actualidad, sin necesidad de alterar las muestras o exponerlas a radiaciones perjudiciales de alta energía. Este avance parecía imposible. Al fin y al cabo, hace más de 100 años, el físico y óptico alemán Ernst Abbe describió una limitación fundamental de cualquier microscopio que se base en la capacidad de las lentes para focalizar la luz o cualquier otra radiación: la difracción difumina los detalles de los objetos cuyas dimensiones sean menores que media longitud de onda de la radiación utilizada.

Los nuevos microscopios —representados por el microscopio de efecto túnel, por el cual Gerd Binning y Heinrich Rohrer, del laboratorio de investigación de la empresa IBM en Zurich, recibieron el premio Nobel en el año 1986— superaron con facilidad la barrera de Abbe. El principio rector de su funcionamiento ya había sido descrito en 1956. J. A. O'Keefe, que por entonces trabajaba en el Servicio Cartográfico del Ejército de los Estados Unidos, diseñó un microscopio en el que la luz atravesaría un pequeño orificio para incidir a continuación sobre una pantalla opaca, iluminando un objeto situado justo enfrente de dicha pantalla. La luz transmitida a través de la muestra o reflejada a través del orificio quedaría registrada durante un barrido de la muestra. O'Keefe señaló que la resolución de este "microscopio de barrido de campo próximo" estaría limitada únicamente por el tamaño del orificio y no por la longitud de onda de la luz. En principio, este dispositivo permitiría obtener imágenes de alta resolución, es decir, imágenes con detalles de tamaño mucho menor que la mitad de una longitud de onda.

O'Keefe era consciente de que no existía la técnica necesaria para fijar la posición de un objeto o moverlo con la precisión requerida. Sin embargo, en el año 1972, Eric Ash, del University College de Londres, adoptó la estrategia de O'Keefe para superar la barrera de Abbe recurriendo a una radiación de longitud de onda larga. Hizo pasar una radiación de microondas con una longitud de onda de tres centímetros a través de un orificio de tamaño similar al de una cabeza de alfiler y la dirigió sobre un objeto situado ante él, registrando una imagen con una resolución de 150 micras, es decir, una longitud 200 veces menor que la longitud de onda de la radiación utilizada.

Por aquel entonces se disponía ya de medios para controlar la posición y el movimiento de una muestra con la precisión necesaria para superar la resolución de un microscopio óptico ordinario. En el mismo año en que tuvo lugar la demostración de Ash, Rusell Young, de la Oficina Nacional de Pesos y Medidas, consiguió manipular objetos de tres dimensiones con una precisión del orden del nanómetro (la mil millonésima parte de un metro). Para ello se sirvió de cerámicas piezoeléctricas, que cambian de tamaño en una escala ínfima cuando varía el valor del potencial eléctrico a que está sometido el material. El control mediante materiales piezoeléctricos abrió el camino para el desarrollo, en 1981, del exponente máximo de un microscopio de barrido de campo próximo, el denominado STM, o microscopio de efecto túnel [véase "El microscopio de efecto túnel", por Gerd Binnig y Heinrich Rohrer, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1985].

En el microscopio de efecto túnel, la "apertura" es una sonda de tungsteno pequeña. El extremo de la misma, finísimo, puede constar de un solo átomo y medir 0,2 nanómetros de anchura. Los controles piezoeléctricos aproximan la punta hasta una distancia de

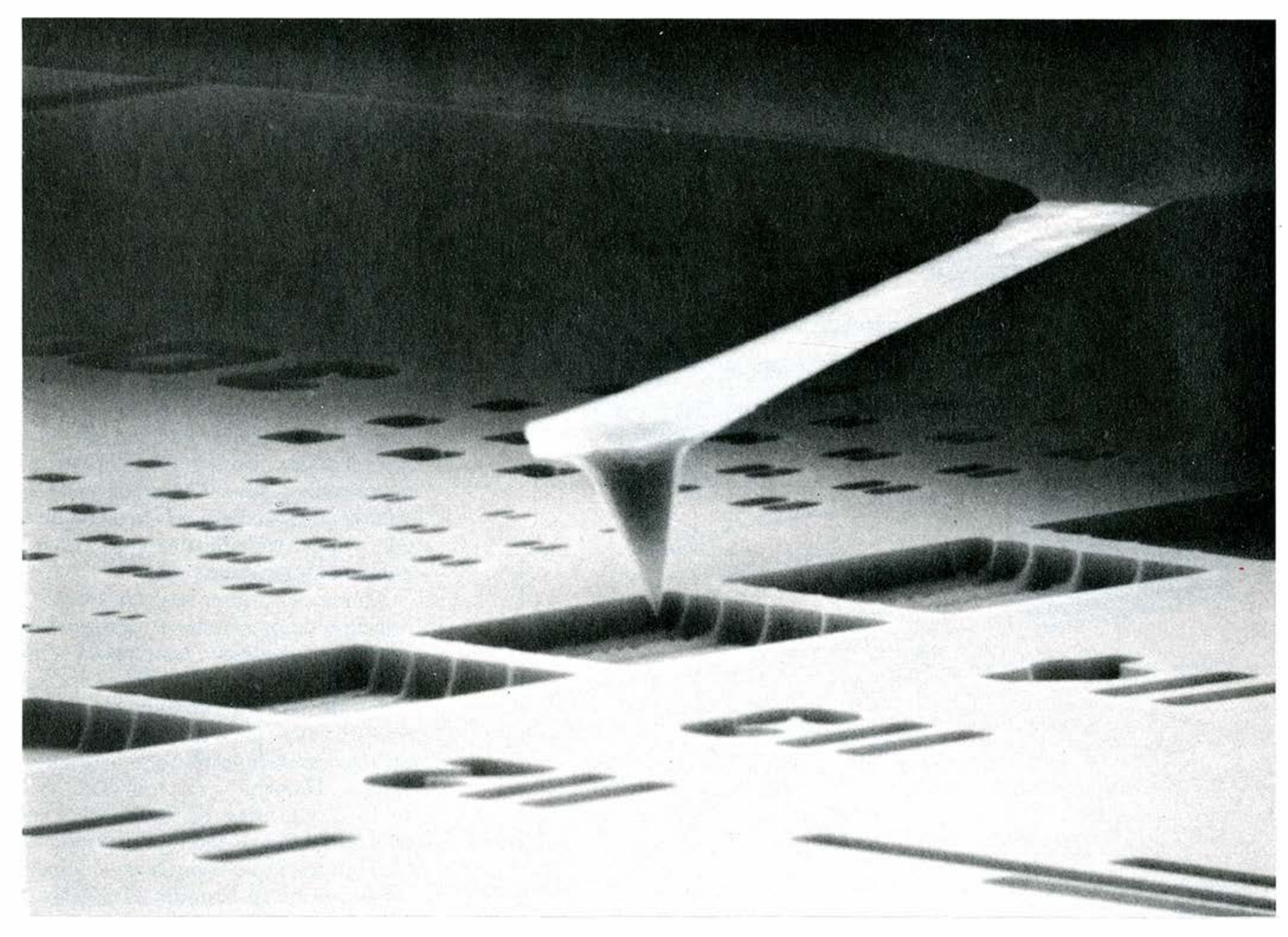
H. KUMAR WICKRAMASINGHE dirige la sección de mediciones físicas del centro de investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, Nueva York, donde se ha especializado en microscopios con sonda de barrido y sus aplicaciones en la fabricación de dispositivos microelectrónicos. Después de alcanzar el grado de doctor en el University College de Londres en 1974, pasó a la Universidad de Stanford; aquí llevó a cabo algunos trabajos básicos sobre acústica y microscopía fotoacústica. En 1984 se incorporó en IBM. En su tiempo libre le gusta hacer excursiones al monte con su familia.

uno o dos nanómetros de la superficie de una muestra conductora, cercanía en que las nubes electrónicas del átomo del extremo de la sonda y del átomo más próximo de la muestra se solapan. Cuando se aplica un pequeño voltaje a la sonda, los electrones atraviesan ese intervalo (efecto túnel) y dan lugar a la aparición de una minúscula corriente. La intensidad de la corriente en cuestión es extraordinariamente sensible al valor de la distancia de separación; de manera característica, la intensidad disminuye en un factor 10 cuando la distancia en cuestión aumenta en 0,1 nanómetros, es decir, la mitad del diámetro de un átomo.

Los controles piezoeléctricos *X* e *Y* (que gobiernan el movimiento en las dos dimensiones de un plano) mueven la sonda a lo largo y ancho de la superficie de la muestra en un barrido exhaustivo, de forma tal que las sucesivas trayectorias paralelas del barrido están separadas quizá sólo una fracción de nanómetro. Si la sonda se mantuviera a una altura constante, la corriente originada por el efecto túnel variaría de modo espectacular, aumentando cuando la sonda pasara sobre elevaciones del tenor de los átomos de la superficie de la muestra y disminuyendo hasta anularse cuando cruzara los intervalos existentes entre los átomos. Lo que sucede en realidad es que la sonda se mueve hacia arriba y hacia abajo siguiendo la topografía de la muestra. Un mecanismo de retroalimentación detecta las variaciones que se producen en la corriente originada por efecto túnel y varía el voltaje aplicado a un tercer control *Z*. El control piezoeléctrico *Z* mueve la sonda en un sentido vertical en la cuantía necesaria para estabilizar la corriente, lo cual equivale a mantener constante la distancia entre el extremo del microscopio y la superficie de la muestra.

Las variaciones en el voltaje aplicado al control piezoeléctrico *Z* se traducen electrónicamente en una imagen del relieve de la superficie. Si la agudeza de la sonda, la precisión de los controles y la finura del sistema de barrido son suficientes, las imágenes del STM pueden llegar a resolver átomos individuales, cuyo diámetro es del orden de 0,2 nanómetros. Una resolución, pues, extraordinaria: la longitud de onda mecánico-cuántica de los electrones que experimentan el efecto túnel en la sonda —es decir, la "radiación" que da lugar a la imagen— es de aproximadamente un nanómetro.

El mapa que levantan estas imágenes no es de naturaleza topográfica en el sentido literal de la palabra; antes bien, representan una superficie de efecto túnel equiprobable. La probabilidad de que se produzca el efecto túnel no queda unívocamente determinada por la topografía de la superficie de la muestra, ya que se ve afectada también por las variaciones en la abundancia y energía de los electrones superficiales. Cuando la muestra que se observa sólo contiene un elemento, la probabilidad de que se produzca el efecto túnel se ajusta estrechamente a su topografía, "topografía" que pone de manifiesto



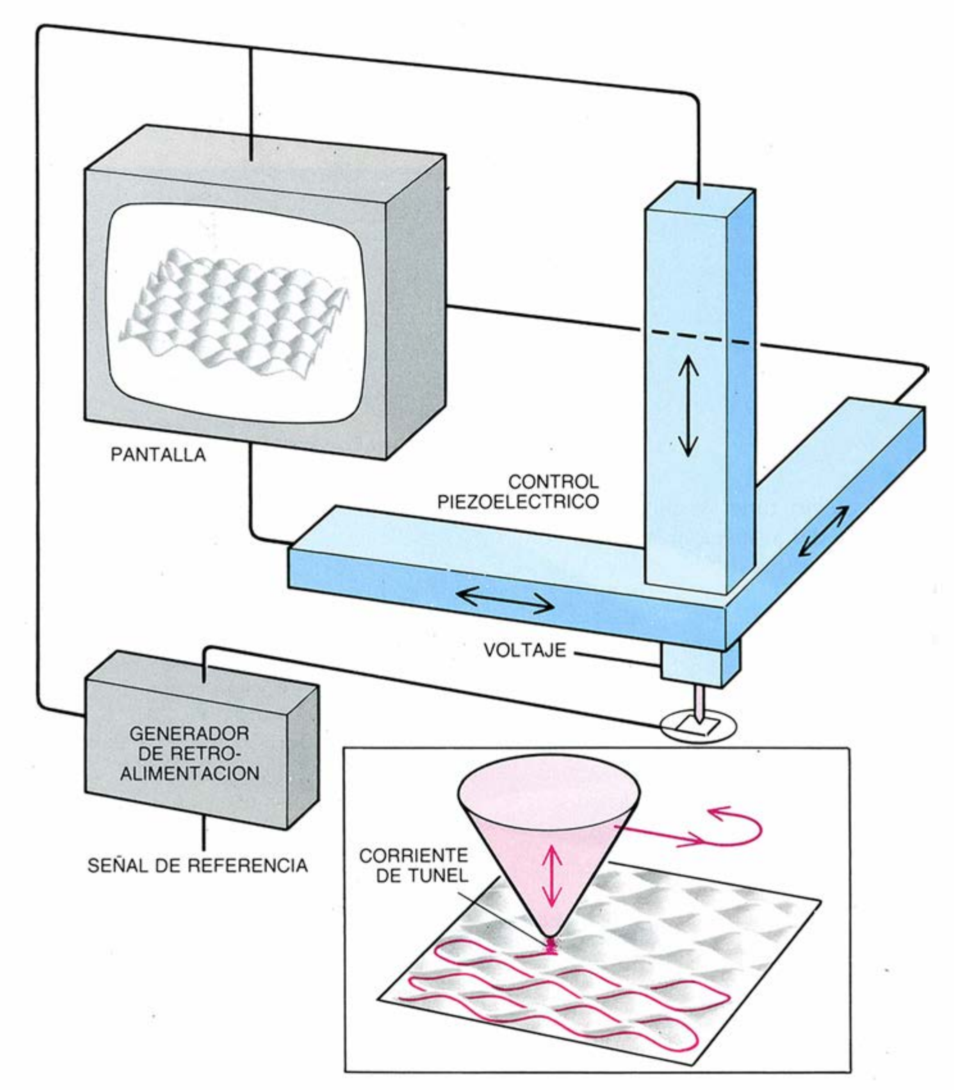
1. SONDA DE SILICIO de un microscopio de fuerza de láser, afilada hasta alcanzar un espesor de pocos átomos; se cierne sobre una superficie. El microscopio, desarrollado en el laboratorio del autor, proporciona imágenes del relieve de una superficie barriéndola con una sonda vibrante muy pequeña, situada a escasos nanómetros (mil millonésimas de metro) por encima de la muestra, desde donde "percibe" débiles fuerzas atractivas provenientes de la superficie. Esta microfotografía de 1300 aumentos muestra una sonda desarrollada por Olaf Wolter, de la central alemana de IBM en Sindelfingen.

también las variaciones en la composición atómica. Por ejemplo, la presencia de un átomo contaminante en una superficie, en lo demás uniforme, puede dar lugar a una anomalía en forma de protuberancia o de pozo, en función de sus propiedades electrónicas.

El éxito del STM renovó la confianza de los investigadores ante la posibilidad de utilizar una sonda para observar una muestra con una precisión del orden del tamaño atómico sirviéndose de controles piezoeléctricos. Desde aquella fecha, este microscopio ha permitido obtener imágenes de la superficie de múltiples sustancias y se han aprovechado incluso sus propiedades para utilizarlo a escala nanométrica: la punta de la sonda de este instrumento nos faculta para aplicar con gran precisión un voltaje capaz de disecar moléculas o de estudiar sus propiedades electrónicas.

Más aún, el STM posibilitó al nacimiento de toda una familia de microscopios con sonda de barrido basados en una tecnología similar a la descrita. El primer vástago de esta serie tenía por objetivo superar una de las principales limitaciones de su progenitor: la obtención de imágenes con el STM está restringida fundamentalmente a los conductores eléctricos. Con frecuencia, hasta los materiales conductores o semiconductores, como el silicio, están recubiertos por una capa de óxido aislante. Aunque los materiales biológicos no suelen ser conductores, con el STM se han podido cartografiar ciertas muestras biológicas colocadas en una superficie conductora y sumergidas en un electrolito.

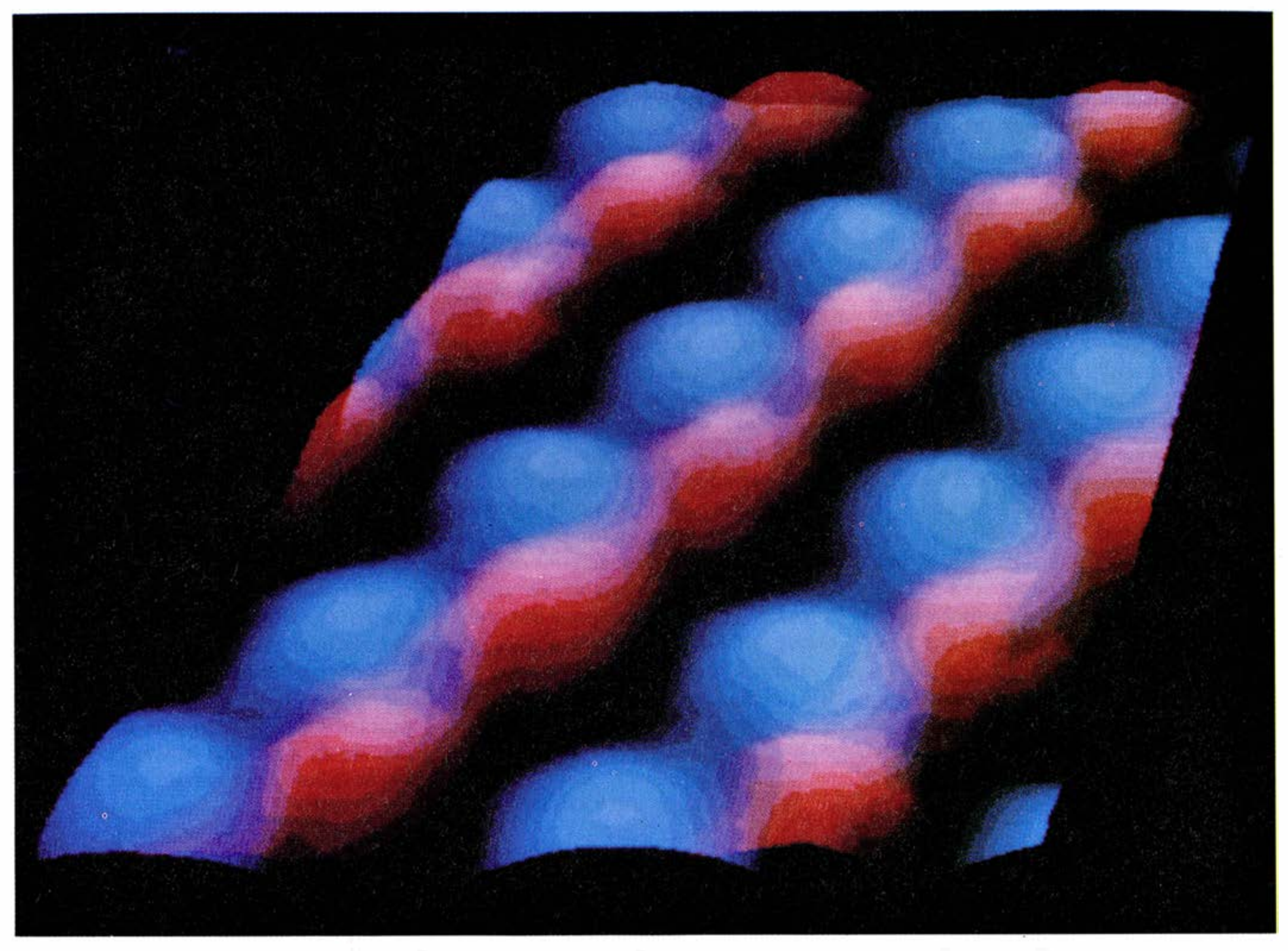
En el año 1985, Binnig, junto con Calvin F. Quate, de la Universidad de Stanford, y Christoph Gerber, de la IBM de Zurich, diseñaron el microscopio de fuerza atómica (AFM), un dispositivo con sonda de barrido que no requería que la muestra fuera conductora. Al igual que el STM, este microscopio se basa en el movimiento de una aguja pequeñísima —en este caso, una punta de diamante de dimensiones atómicas montada en una lámina metálica— sobre la muestra sometida al barrido. En lugar de la corriente producida por efecto túnel, el AFM registra los perfiles de la fuerza repulsiva originada por el solapamiento de la nube de electrones de la punta con las nubes de electrones de los átomos superficiales de la muestra. De manera similar a la aguja de un tocadiscos, la punta de la sonda "lee" la superficie de la muestra. La lámina metálica actúa a modo de resorte que mantiene la punta de la sonda en contacto con la superficie durante su recorrido por la topografía atómica, siguiendo una serie de surcos paralelos sucesivos.



2. MICROSCOPIO DE EFECTO TUNEL (STM): percibe la topografía de una superficie a escala atómica por medio de electrones que atraviesan, por efecto túnel, el intervalo entre la sonda y la superficie. Una cerámica piezoeléctrica, cuyo tamaño cambia ligeramente en respuesta a los cambios en el voltaje aplicado, gobierna la sonda de tungsteno en tres dimensiones. Se aplica un voltaje a la punta de la sonda, que se acerca hacia la superficie (conductora o semiconductora) hasta que se inicia una corriente de túnel. La punta va peinando la superficie en una serie de surcos sucesivos. La corriente de túnel tiende a variar con la topografía; un mecanismo de retroalimentación responde moviendo la punta arriba y abajo, siguiendo el relieve de la superficie. Los movimientos de la punta se traducen en una imagen.

En el diseño original del AFM, la medición de la deflexión de la lámina se llevaba a cabo con la producción de una corriente de túnel entre dicha lámina y la punta de un STM montada sobre ella. Un mecanismo de retroalimentación respondía a las variaciones de la corriente de túnel, ajustando el voltaje aplicado a un control piezoeléctrico *Z* que movía la muestra verticalmente. La deflexión y, por tanto, la fuerza repulsiva, se mantenía constante; las variaciones en el voltaje aplicado al control piezoeléctrico *Z* reproducían los rasgos topográficos de la muestra y servían de base para la formación de la correspondiente imagen. De este modo, dicha imagen podía resolver átomos individuales. Al igual que en el STM, el poder de resolución del AFM era muy grande; dicha resolución venía limitada únicamente por la acuidad de la punta de la sonda de diamante y no por ninguna longitud de onda.

Aunque el primer AFM era capaz en principio de proporcionar imágenes de cualquier substancia, conductora o no, la presión de la punta de diamante (del orden de una millonésima de gramo) era suficiente para distorsionar o mover muchas de las moléculas biológicas. Paul K. Hansma y sus colaboradores, de la Universidad de California, han reducido dicha presión en un factor de 10. Un factor que contribuye a aumentar la presión de la punta es la delgada película de agua y contaminantes que inevitablemente se depositan sobre la punta y sobre la superficie de la muestra. Cuando la punta se acerca mucho a la superficie y las capas de contami-



3. ALINEACION DE LOS ATOMOS, a modo de cuentas de un rosario, en esta imagen de una muestra de arseniuro de galio, un semiconductor, obtenida con un STM. Esta imagen es compuesta: dado que los átomos de galio (*azul*) y de arsénico (*rojo*) tienen diferentes propiedades eléctricas, sus imágenes se han obtenido por separado, bajo condiciones diferentes. En el caso de los átomos de galio, la corriente túnel fluía desde la punta —cargada negativamente— hacia la muestra; para los átomos de arsénico, la punta del STM estaba cargada positivamente y el sentido de la corriente se invertía. Esta imagen la proporcionó Randall M. Feenstra, quien trabaja en el laboratorio de investigación Thomas J. Watson de la compañía IBM en Yorktown Heights.

nantes entran en contacto, aparecen unas fuerzas de adhesión que tienden a unir la punta con la muestra, con lo que se refuerza la presión de barrido. El grupo de Hansma ha eliminado este efecto sumergiendo punta y muestra en una gota de agua.

Los investigadores han reemplazado también el mecanismo del STM por un nuevo sistema de detección de la deflexión de la sonda, desarrollado en el centro de investigación de IBM Thomas J. Watson, en Yorktown Heights, Nueva York; consiste en un haz de láser que la lámina refleja. El movimiento de la lámina altera la trayectoria del haz reflejado, de tal forma que una célula fotoeléctrica colocada en la trayectoria del haz, a cierta distancia, es capaz de detectar los pequeños movimientos que experimenta la lámina. La señal producida por la célula fotoeléctrica activa el control piezoeléctrico Z para que la separación se mantenga constante. El sensor óptico proporciona una medida más precisa de la deflexión de la punta que el sensor basado en el efecto túnel y ello hace que el contacto del AFM sea más consistente y suave. Como resultado de todas estas mejoras, Hansma y sus colaboradores han llegado a obtener imágenes de sustancias biológicas con un detalle casi atómico. Han tomado incluso instantáneas de un proceso molecular a medida que va transcurriendo; en concreto: la polimerización de la proteína de fibrina, uno de los componentes principales de los coágulos de la sangre.

Al mismo tiempo que el AFM se iba desarrollando, mi grupo del departamento de investigación de IBM en Yorktown Heights estaba investigando nuevas formas de controlar la calidad en la fabricación de materiales microelectrónicos. En su esfuerzo por construir ordenadores más rápidos y potentes, los ingenieros están disminuyendo constantemente el tamaño de los elementos de los circuitos y de los dispositivos de almacenamiento de datos. La búsqueda de imperfecciones en los circuitos hace necesario trabajar con resoluciones al menos 10 veces menores que el tamaño del menor de los elementos; las dimensiones de los propios elementos de los circuitos se están acercando ya al límite de resolución teórica de los microscopios ópticos ordinarios, que es del orden de 250 nanómetros.

Durante algún tiempo, el microscopio electrónico de barrido (SEM) se convirtió en la herramienta microelectrónica habitual: este instrumento permite resolver hasta un detalle de algunos nanómetros. Sin embargo, el SEM requiere que la muestra esté revestida por una capa metálica y que se observe al vacío; su resolución tridimensional es baja. Por otra parte, sus electrones de alta energía pueden dañar o destruir un dispositivo de semiconductor, lo que limita el valor del SEM en el control de calidad de estos dispositivos. Los microscopios con sonda de barrido —sencillos, directos y potentes— parecían responder a nuestras necesidades.

Sin embargo, la utilización del STM exige que la muestra sea conductora, cuando en los dispositivos microelec-

trónicos se utilizan materiales semiconductores y aislantes además de conductores. El AFM puede proporcionar imágenes de un conjunto más amplio de materiales; ahora bien, el propio AFM avanzado, más suave, contacta con los materiales con fuerza suficiente para contaminar o dañar los elementos delicados de los circuitos. Por eso, mis colegas y yo hemos desarrollado una nueva familia de microscopios con sonda de barrido, capaces de registrar los perfiles de los dispositivos electrónicos, cualquiera que sea su composición, sin necesidad de rozar su superficie.

El más logrado de ellos es el microscopio de fuerza de láser (LFM), inventado en colaboración con Yves Martin y Clayton C. Williams. La "fuerza" del LFM es la pequeña interacción atractiva que aparece entre una superficie y una sonda situada a una distancia de 2 a 20 nanómetros, un intervalo mucho mayor que en el STM y el AFM. En los materiales semiconductores y aislantes, la fuerza es consecuencia principalmente de la tensión superficial del agua que condensa entre la punta de la sonda y la superficie de la muestra, pero intervienen también las fuerzas de van der Waals (débiles y transitorias interacciones electrostáticas entre los átomos o las moléculas).

La fuerza atractiva es ínfima, mil veces menor que las repulsiones interatómicas registradas con el AFM. El LFM detecta la existencia de esta fuerza a través de su efecto sobre la dinámica de una sonda vibrante, un afilado alambre de tungsteno de medio milímetro de longitud con una punta vuelta hacia abajo, cuyo diámetro queda reducido a 50 nanómetros o menos. (Recientemente se han utilizado sondas de silicio cuyo extremo es finísimo, de tamaño atómico.) Un transductor piezoeléctrico situado en la base del alambre transforma la corriente variable en una vibración. La frecuencia base del transductor se halla por encima mismo de la frecuencia de resonancia mecánica más baja del alambre (cifrada en unos 50 kilohertz).

Dado que el alambre en cuestión está vibrando con una frecuencia muy próxima a la de resonancia, amplifica la señal de base de forma análoga a la lengüeta de un instrumento musical. La punta de la sonda puede oscilar medio nanómetro, aun cuando el transductor del otro extremo sólo se esté desplazando una centésima de nanómetro a lo más. Sin embargo, cuando la punta vibrante se aproxima a la muestra, las débiles fuerzas atractivas que percibe "ablandan" el alambre y decae su frecuencia de resonancia, que se aleja entonces de la frecuencia base, con lo cual disminuye la amplitud de la vibración.

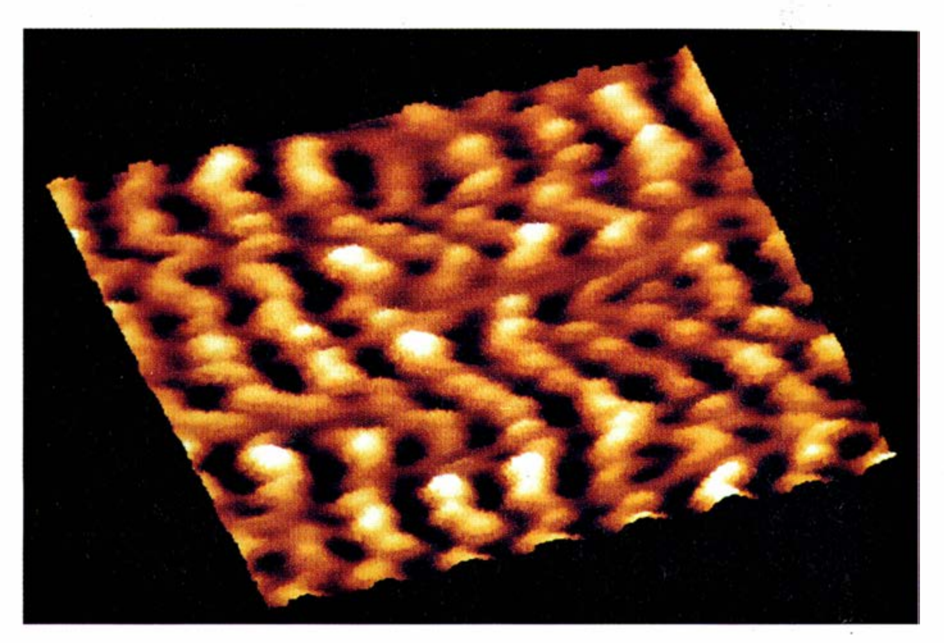
Un sensor de láser detecta el cambio de amplitud. Esta detección se lleva a cabo por interferometría, técnica de uso en la medición precisa de distancias con frecuente aplicación, por citar dos casos, en astronomía y geofísica. Un haz de láser se desdobla en un haz de referencia, reflejado por un espejo o un prisma estacionario, y un haz de exploración, reflejado en la parte posterior de la punta de la sonda. Los dos haces reflejados se recombinan e interfieren entre sí para dar lugar a un haz cuya fase es extremadamente sensible a la longitud recorrida por el haz de exploración. La fase se desplaza en un sentido u otro con cada oscilación de la punta; la cuantía de este desplazamiento pone de manifiesto la amplitud de la vibración. El interferómetro puede así detectar cambios de amplitud mínimos, de sólo 10^{-5} nanómetros.

La amplitud tiende a disminuir cuando la sonda pasa sobre las protuberancias topográficas de la muestra, donde las fuerzas atractivas son más fuertes, y a aumentar cuando dicha sonda está situada sobre las depresiones. Tal y como sucede en los otros microscopios con sonda de barrido, un mecanismo de retroalimentación responde a los cambios que se producen en el comportamiento de la punta de la sonda variando el voltaje aplicado a un control piezoeléctrico Z con el fin de estabilizar la amplitud de la vibración y, en consecuencia, la separación existente entre la sonda y la superficie de la muestra. Con las fluctuaciones en el voltaje piezoeléctrico se dibuja el perfil de la superficie.

Procediendo de este modo, el LFM puede detectar el relieve de la superficie con una precisión del orden de 5 nanómetros (equivalente al espesor de unos 25 átomos), y, dada su capacidad de percibir la topografía de la superficie desde cierta distancia, puede inspeccionar la situación en el interior de

4. MICROSCOPIO DE FUERZA ATOMICA (AFM): barre una muestra con un diamente montado en un delgado brazo metálico. La nube de electrones de la punta del diamante (que puede acabar en un solo átomo) interacciona con las nubes de electrones de los distintos átomos de la muestra, produciendo una fuerza repulsiva que varía con el relieve de la superficie. Esta fuerza actúa sobre la sonda y los movimientos que produce se recogen mediante un haz de láser que se refleja en el brazo que la sostiene y que detecta finalmente en un sensor de fotodiodo. Un mecanismo de retroalimentación responde a los cambios en la trayectoria del haz activando un control piezoeléctrico que ajusta la altura de la muestra de tal forma que la deflexión del brazo permanezca constante. Los movimientos de la muestra dibujan el perfil de la superficie. El AFM proporciona sin problemas imágenes de materiales aislantes.

grietas profundas y estrechas. Este instrumento promete ser de gran valor, no sólo para el examen de microcircuitos terminados, sino también para el control de calidad de las superficies de silicio sobre las que se construyen. Estos circuitos presentan estructuras de algunos centenares de nanómetros de profundidad y decenas de nanómetros de espesor; por eso, un sustrato que deje de ser perfectamente liso en una cuantía algo mayor que unos cuantos espesores atómicos puede resultar inaceptable. Por idéntica razón, la densidad cada vez más elevada con que se almacena la información en los discos magnéticos significa que los datos deben escribirse y leerse en una escala más fina, con cabezales menores que se acerquen mucho más a los discos. Para evitar la colisión, tanto los discos como los cabezales tienen que ser tan lisos que deben construirse con una precisión casi atómica.



5. CADENAS DE POLIMEROS del aminoácido alanina; forman una estructura rugosa en la placa de un microscopio sobre la que se depositó y evaporó una disolución de dicho polímero. En esta imagen de AFM, obtenida por Paul K. Hansma y su equipo, de la Universidad de California, cada protuberancia corresponde a un aminoácido. La imagen muestra una superficie de tres nanómetros de ancho.

Una variante del LFM, el microscopio de fuerza magnética (MFM), nos permite verificar las prestaciones de esos cabezales, que se pueden resumir en la definición, uniformidad e intensidad del campo magnético que producen. En lugar de la aguja de tungsteno o silicio, el MFM está provisto de una sonda imantada de níquel o hierro. Cuando la sonda vibrante se aproxima a una muestra magnética, la punta se ve sometida a una fuerza que cambia su frecuencia de resonancia y, con ello, su amplitud de vibración. El MFM puede perfilar la estructura del campo magnético originado por los cabezales de registro de datos con una resolución superior a los 25 nanómetros. Este dispositivo permite también estudiar la estructura de las unidades magnéticas ("bits") de almacenamiento de datos en los discos y en otros medios, proporcionando información tanto sobre el funcionamiento de los cabezales como sobre la calidad del medio de almacenamiento.

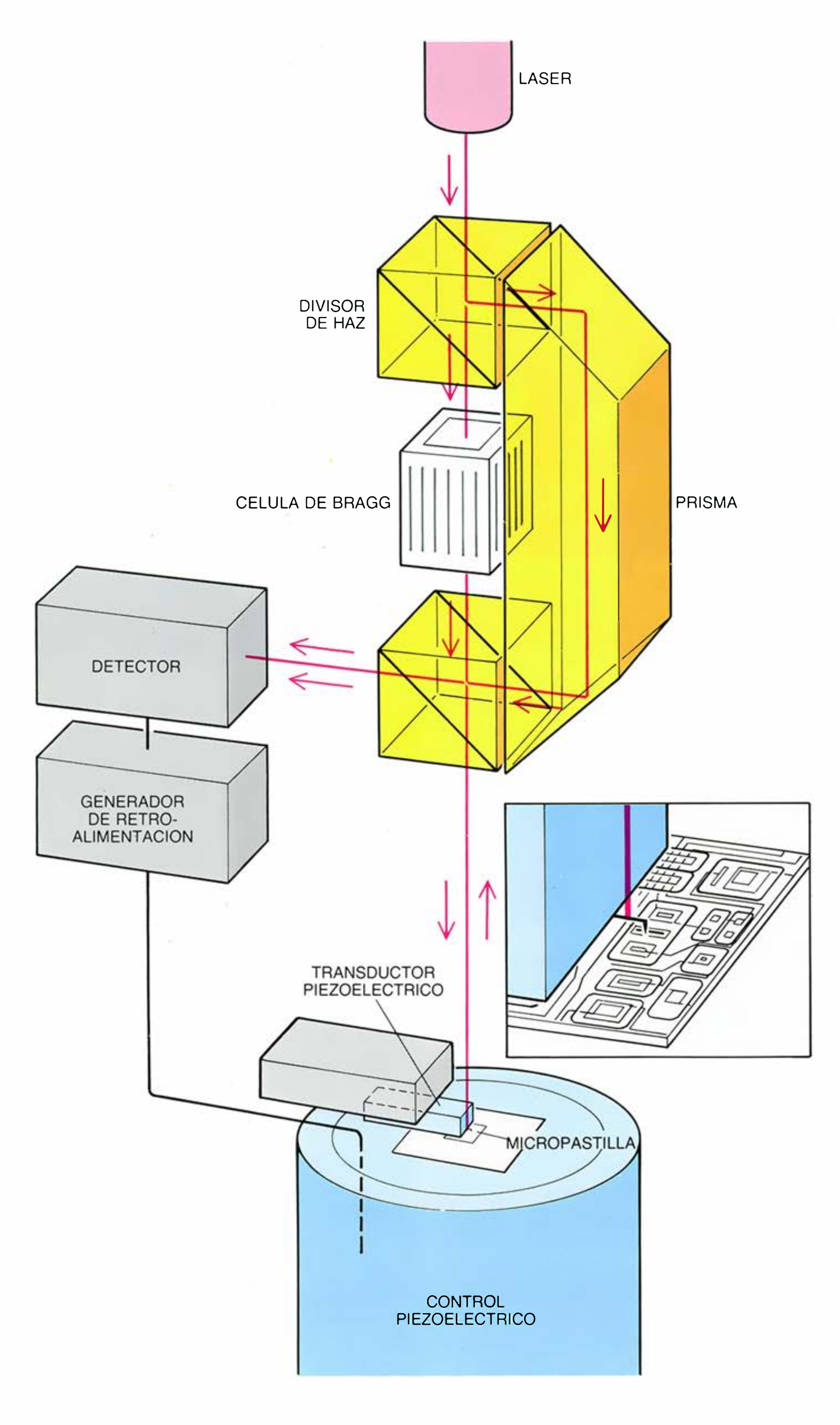
Yves Martin, David Abraham y yo mismo hemos desarrollado otra versión especializada del LFM, el microscopio de fuerza electrostática, que probablemente venga a llenar un vacío en el diseño y fabricación de materiales microelectrónicos. En este caso, la sonda vibrante posee una carga eléctrica y la amplitud de vibración resulta afectada por las fuerzas electrostáticas que originan las cargas de la muestra. Con la ayuda de este microscopio se pueden describir las propiedades eléctricas de los microcircuitos a muy pequeña escala. Y, así, para modificar las propiedades del silicio, se le suelen añadir pequeñas cantidades de átomos de impurezas, conocidas con el nombre genérico de contaminantes. Estos contaminantes proporcionan electrones, que se mueven con libertad en el seno del silicio, o capturan electrones, que dejan "huecos" cargados positivamente, capaces también de moverse por la red cristalina.

La distribución y concentración de los átomos contaminantes desempeñan un papel crítico para el buen funcionamiento de una pastilla ("chip"). Una forma de esquematizar la situación de estos átomos contaminantes consiste en aplicar un voltaje entre la sonda de un microscopio de fuerza electrostática y la superficie de la muestra. El voltaje origina una migración de los electrones o agujeros de conducción por debajo de la sonda, apareciendo así una región cargada que ejerce una fuerza electrostática sobre dicha sonda. Los movimientos consiguientes de la sonda proporcionan una medición muy precisa a pequeña escala de la carga eléctrica y, en consecuencia, de los electrones o agujeros involucrados y de las correspondientes concentraciones de átomos contaminantes.

Los microscopios de fuerza magnética y electrostática son dos de los sistemas con sonda de barrido que se han diseñado para registrar otras propiedades superficiales de los materiales distintas de las meramente topográficas. Está también el microscopio térmico de barrido, que yo desarrollé en colaboración con Williams. La sonda de este microscopio es, quizás, el termómetro más fino del mundo; este dispositivo es sensible a variaciones de temperatura superficial del orden de la diezmilésima de grado a una escala de decenas de nanómetros. La sonda consiste en un alambre de tungsteno rematado en una punta cuya sección medirá unos 30 nanómetros. Un revestimiento de otro metal, níquel, cubre la sonda. El níquel queda separado del tungsteno por una capa aislante en toda la extensión de la sonda, salvo en su extremo. La unión níquel-tungsteno se comporta como un termopar, generando un voltaje proporcional a su temperatura.

El microscopio térmico de barrido fue desarrollado en las primeras etapas de nuestra búsqueda de la mejor forma de levantar perfiles de los dispositivos microelectrónicos, antes de la introducción de los AFM y LFM. En nuestros primeros experimentos, llevados a cabo en 1985, encontramos que este dispositivo podía servir realmente como una sonda superficial rápida. En primer lugar, se hacía pasar una corriente a través de la punta que calentara la sonda; cuando la energía desprendida al aire en forma de calor es igual a la energía sumistrada en forma de corriente, la temperatura de la punta se estabiliza, alcanzando por regla general un valor de algunos grados por encima de la temperatura del entorno.

Cuando la punta calentada se aproxima a una muestra, que por ser un sólido conduce el calor mucho mejor que



6. EL MICROSCOPIO DE FUERZA DE LASER ofrece una imagen topográfica de una muestra (típicamente un componente microelectrónico) pasando una sonda de tungsteno o silicio a una altura de pocos nanómetros sobre la muestra en cuestión. La punta vibra con una frecuencia cercana a su frecuencia de resonancia. Las fuerzas atractivas de van der Waals y la tensión superficial del agua que condensa entre la sonda y la muestra actúan sobre la sonda, modificando su frecuencia de resonancia y reduciendo con ello su amplitud de vibración. La variación de dichas fuerzas y, por tanto, del recorrido de la punta de la sonda responde al relieve de la superficie. Una sonda de láser controla la posición de la punta por medio de un haz que se desdobla en dos. Uno de estos haces se refleja en un prisma estacionario; el otro atraviesa una célula de Bragg —dispositivo que modifica la frecuencia del haz— y es reflejado por la cara posterior de la sonda. Los dos haces se recombinan y su interferencia produce una señal (para la frecuencia de la célula de Bragg) que mide la vibración de la sonda. (Hank Iken.)

el aire, la tasa de pérdida de calor aumenta. La disminución que experimenta el voltaje en la unión del termopar a consecuencia del enfriamiento proporciona una medida de la distancia que separa la punta de la muestra. (Para reducir la sensibilidad del sistema a las fluctuaciones erráticas de la temperatura, lo que hacemos en realidad es conferir una vibración a la punta de la sonda de amplitud menor que el nanómetro, con una frecuencia del orden de un kilohertz. El voltaje disminuye cada vez que la punta se acerca a la muestra y aumenta cuando se separa de ella; la amplitud de la fluctuación del voltaje aumenta cuando la distancia media que separa la punta vibrante de la muestra disminuye.) En consecuencia, la pérdida de calor revela los detalles de la topografía de la superficie de dicha muestra conforme la sonda la va barriendo, de forma análoga a como sucede en el caso de la corriente de efecto túnel, la repulsión interatómica o las atracciones de van der Waals en los otros modelos de microscopios con sondas de barrido.

El proceso de fabricación no permite obtener sondas termopares cuyas dimensiones bajen más allá de los 30 nanómetros, lo cual limita el poder de resolución de los microscopios térmicos de barrido. La aparición del LFM, cuya resolución es mucho mayor, desvió la sonda térmica hacia otros usos más especializados. Con esa sonda se pueden obtener imágenes que muestren las variaciones de temperatura en las células vivas, proporcionando así datos sobre los mecanismos del metabolismo; puede medir el flujo de una pequeña corriente de líquido o gas mediante el control de las pérdidas de calor que se producen cuando la punta de la sonda se calienta y se coloca en el seno de dicha corriente. Permite también la utilización de una técnica analítica conocida por espectroscopía de absorción fototérmica, con un nivel de resolución sin precedentes.

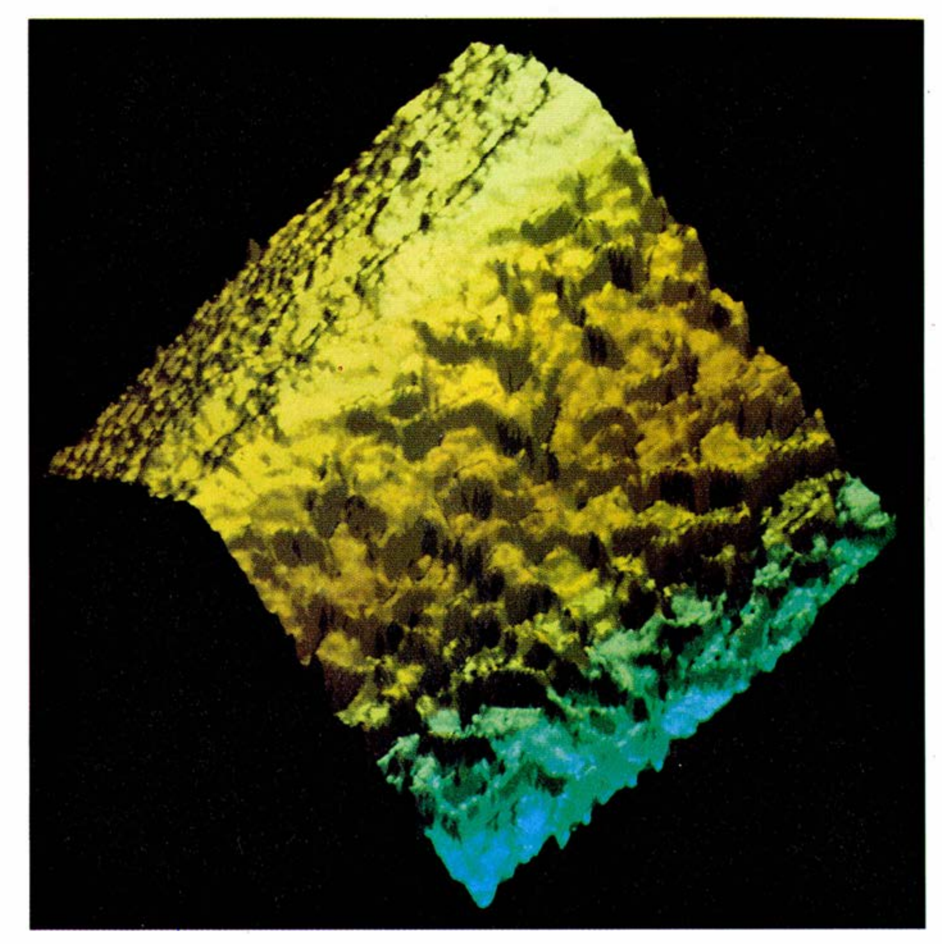
La espectroscopía de absorción fototérmica se basa en el hecho de que cada elemento absorbe luz con mayor eficiencia a una longitud de onda específica. El procedimiento consiste en enviar un haz de láser de longitud de onda variable sobre la muestra en estudio. Se toma la temperatura de la muestra conforme se va variando la longitud de onda del láser; una brusca elevación de temperatura con una determinada longitud de onda pone de manifiesto la mayor eficiencia de la ab-

sorción. Una "huella dactilar" completa de las longitudes de onda de absorción puede revelar la composición de la muestra. La sonda térmica abre el camino de la espectroscopía a pequeña escala, que posibilitará cartografiar a pequeña escala las variaciones en la composición superficial.

Mi grupo ha incrementado aún más la resolución que permite esta técnica: hasta el nivel de los átomos individuales. Para alcanzar este objetivo, prescindimos del termopar, volviendo a la punta de tungsteno desnuda, puntiaguda a escala atómica, propia del STM. Esta punta representa el papel de uno de los dos metales de un termopar; el otro lo es la propia muestra (si se trata de un metal) o un electrodo de metal sobre el que se deposita dicha muestra. Al principio, el instrumento opera de forma análoga al microscopio de efecto túnel. Se establece una diferencia de potencial entre la punta de la sonda y el metal y se va acercando la punta hacia la superficie, hasta que empieza a circular una corriente por efecto túnel.

A continuación, se interrumpe la corriente y se calienta la superficie con la ayuda del láser de longitud de onda variable. El pequeño termopar formado por la superficie calentada y la sonda (que se calienta como consecuencia de su proximidad a la superficie) genera un voltaje cuyo valor es proporcional a su temperatura. A su vez, el valor de la temperatura indica cuánta energía se ha absorbido por el átomo sobre el que se encuentra la sonda. La absorción puede ser registrada átomo por átomo para cada longitud de onda del láser, lo cual permite discriminar la composición de la muestra con la más elevada resolución.

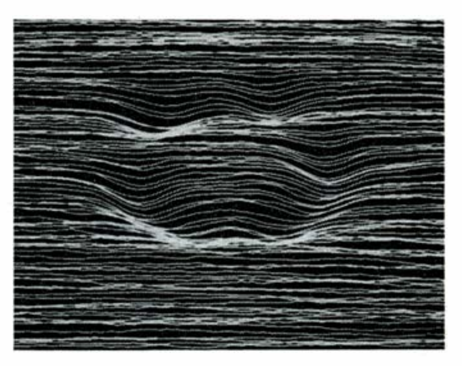
La mera enumeración de esos recientes avances conseguidos en mi laboratorio basta para hacerse una idea de la extraordinaria versatilidad de la técnica de las sondas de barrido. En otros centros se han desarrollado más variantes de esta misma técnica. Gary McClelland y sus colaboradores del centro de investigación Almadén de IBM en San José, California, han modificado el AFM con el fin de poder medir la fricción a escala atómica. Con la punta de la sonda de un AFM se realizan una serie de barridos sucesivos sobre una superficie, al tiempo que un interferómetro de láser mide la deflexión del brazo de la lámina. Utilizando esta técnica, los investigadores han conseguido calibrar —por poner un caso— la resistencia que ofrecen las irregularidades atómicas de una superficie de grafito. De este modo, se espera determinar la forma



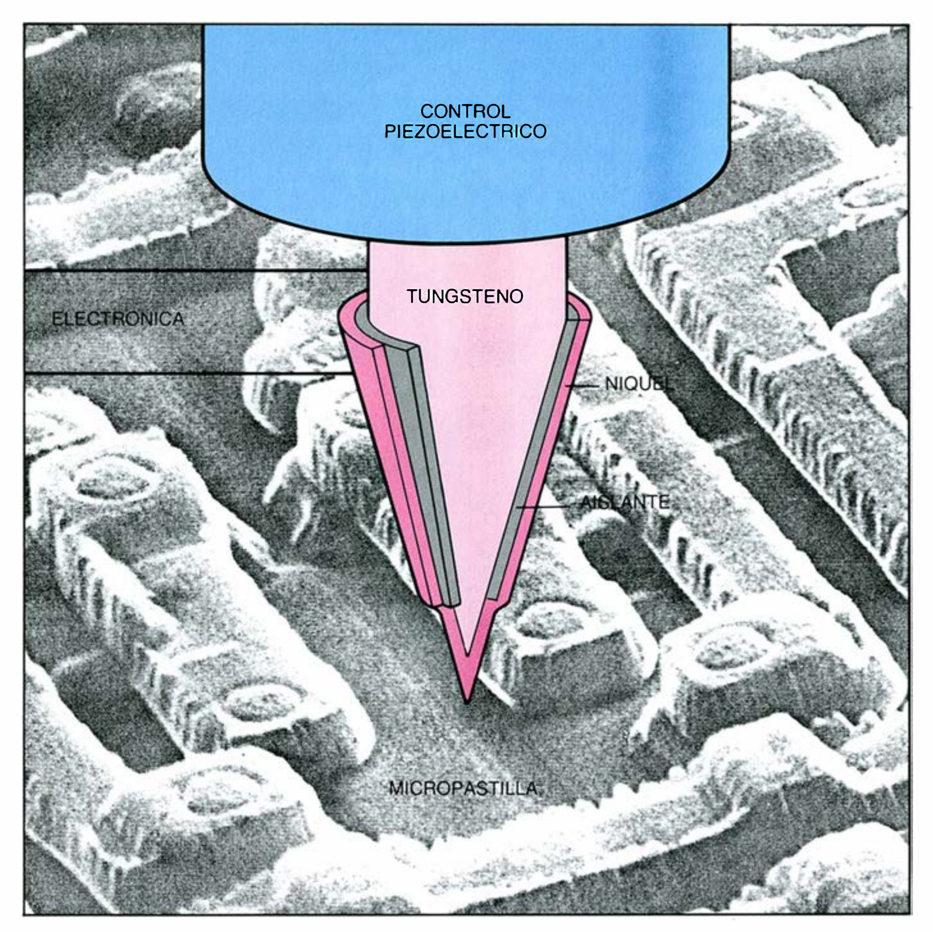
7. **RUGOSIDADES NANOMETRICAS** en un surco grabado en una superficie de silicio de una micra de anchura. Pierre Levy, que trabajaba entonces en el centro de investigación de la compañía IBM en Yorktown Heights, obtuvo esta imagen utilizando un microscopio de fuerza de láser, instrumento capaz de reproducir los perfiles topográficos de una superficie a pequeña y a gran escala.







8. **UNIDADES MAGNETICAS O "BITS"** de una micra o dos de diámetro: aparecen en forma de cráteres en estas imágenes obtenidas con un microscopio de fuerza magnética, un microscopio de fuerza de láser equipado con una sonda imantada de hierro o níquel, sensible a los gradientes de fuerza magnética. Los "bits", que almacenan información en discos magnetoópticos, se forman exponiendo un disco a un campo magnético al mismo tiempo que un láser altamente focalizado calienta la superficie, permitiendo de este modo que los dominios magnéticos de la región calentada se reorienten. En estas imágenes, obtenidas por Yves Martin en el centro de investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, se puede comparar la estructura magnética de un "bit" normal (*izquierda*) con la de otro producido con un láser de baja potencia (*centro*) y con un campo magnético muy débil.



9. SONDAS TERMICAS que registran variaciones de temperatura de hasta la diezmilésima de grado en una escala de decenas de nanómetros. La sonda está constituida por un núcleo de tungsteno recubierto de níquel, pero aislado del mismo en toda su extensión salvo en su punta de 30 nanómetros de espesor. Allí se unen estos dos metales para formar un termopar que genera un voltaje proporcional a su temperatura. Este dispositivo puede cartografiar el relieve de una superficie detectando las variaciones en la pérdida de calor desde la sonda caliente hacia la muestra que va peinando. (Recreación de Hank Iken.)

en que ese rozamiento afecta a las propiedades macroscópicas de los materiales.

Entretanto, el grupo de Hansma ha desarrollado un microscopio de barrido de conductancia iónica (SICM), que barre una muestra, no con una punta de metal o diamante, sino con una micropipeta de vidrio que contiene un pequeño electrodo. Los investigadores sumergen la muestra y la pipeta en un baño electrolítico (verbigracia, una solución salina) y establecen una diferencia de potencial entre el electrodo de la pipeta y otro electrodo del baño. Una corriente de iones tiende a fluir entre los electrodos a través de la apertura de la pipeta, pero cuando la pipeta se acerca a la superficie de la muestra, la corriente se hace más débil. La corriente se anula cuando la pipeta de barrido toca la muestra, dado que este hecho produce la obturación de su abertura.

Equipado con un mecanismo de retroalimentación que mantiene una corriente iónica constante a través de la abertura de la pipeta, el SICM perfila la topografía de una muestra. El tamaño de la abertura de la pipeta limita la resolución del SICM hasta unas 0,2 micras (podría incluso llegarse a los 10 nanómetros). Este dispositivo resulta más indicado para algunas tareas específicas, como puede ser el estudio del comportamiento eléctrico de una célula viva. Cuando se estimula una célula, los canales iónicos de su membrana se abren y se cierran, facilitando el paso de pequeñas corrientes de iones por los mismos. Hansma confía en que, cuando se mejore la resolución del SICM, se puedan detectar los distintos canales iónicos y estudiar su comportamiento.

Otro dispositivo de barrido con micropipeta representa lo que podríamos considerar un retorno a los orígenes de la microscopía de barrido de campo próximo. Hace ya tres décadas que O'Keefe concibió la estrategia con la que superar la barrera de Abbe y mejorar el poder de resolución de los microscopios ópticos; pero en aquel tiempo no existía la técnica necesaria para peinar una muestra con la precisión de una fracción de la longitud de onda. Los controles con una precisión del orden del nanómetro, una innovación adelantada por el STM, han abierto el camino para construir el microscopio óptico de elevado poder de resolución con el que soñaba O'Keefe.

Dos grupos de trabajo, uno dirigido por Dieter Pohl, de IBM de Zurich, y el otro por Michael Isaacson, de la Universidad de Cornell, han diseñado microscopios ópticos de barrido de campo próximo. Se ilumina una de las caras de una muestra muy delgada; la otra cara se barre con una micropipeta cuyas paredes están recubiertas por una lámina de aluminio opaca. Un fotodiodo situado en el extremo de la pipeta mide la luz recogida por la punta. Así se han obtenido microfotografías de luz transmitida con una resolución (limitada por el diámetro de la pipeta) del orden de 50 nanómetros, es decir, la décima parte de una longitud de onda. La utilización de pipetas todavía más delgadas puede proporcionar una resolución de 10 nanómetros, multiplicando por 25 la que proporcionan los mejores microscopios ópticos al uso.

Aunque lejos de reemplazar a la microscopía óptica, la tecnología con sonda de barrido promete extender sus posibilidades. Los microscopistas están ahora en disposición de transferir los refinamientos de los últimos 100 años —técnicas para reforzar el contraste y poner de manifiesto ciertas características específicas, tales como el contraste de polarización, la inmunoflurescencia y el contraste de fase— a la microscopía óptica de barrido de campo cercano. Gracias a los microscopios con sonda de barrido podemos "entrar" en el reino diminuto, nanométrico, de moléculas y microcircuitos. Cuando esta misma técnica se aplique a la microscopía óptica, podremos asomarnos a ese mundo sutil en los términos familiares de luz, sombras y colores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VACUUM TUNNELING: A NEW TECHNIQUE FOR MICROSCOPY, Calvin F. Quate en *Physics Today*, vol. 39, n.° 8, págs. 26-33; agosto de 1986.

TIP TECHNIQUES FOR MICROCHARACTERIZATION OF MATERIALS. Y. Martin, C. C. Williams y H. K. Wickramasinghe en *Scanning Microscopy*, vol. 2, n.° 1, págs. 3-8; marzo de 1988.

SCANNING TUNNELING MICROSCOPY AND ATOMIC FORCE MICROSCOPY: APPLICATION TO BIOLOGY AND TECHNOLOGY. P. K. Hansma, V. B. Elings, O. Marti y C. E. Bracker en *Science*, vol. 242, n.° 4876, págs. 209-216; 14 de octubre de 1988.

Ciencia y sociedad

Los Nobel

Química. El ácido ribonucleico, o ARN, no es únicamente el chico de los recados del ADN; también actúa de catalizador de muchas reacciones celulares. Este año se ha otorgado el premio Nobel de química a Sidney Altman, de la Universidad de Yale, y Thomas R. Cerch, de la Universidad de Colorado en Boulder, por haber realizado tal descubrimiento de forma independiente a finales de los años setenta, hallazgo que en su momento supuso una fuerte convulsión en los principios aceptados. El ARN se convertía, así, en herramienta útil para los biotecnólogos y, en particular, en el campo de defensa contra las infecciones víricas [véase "Función enzimática del ARN", por Thomas R. Cech; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987].

Fisiología y medicina. El Nobel de fisiología y medicina se les ha otorgado a J. Michael Bishop y Harold E. Varmus, de la facultad de medicina de la Universidad de California en San Francisco, por un descubrimiento patético: los genes cancerosos, denominados oncogenes, forman parte de la dotación estándar de las células normales. A mediados de los setenta, muchos investigadores creían que los oncogenes eran introducidos en las células sanas por agentes externos, los retrovirus. Pero en 1976 Bishop y Varmus develaron la verdad: los retrovirus causantes del cáncer roban de las células anfitrionas los oncogenes. Al parecer, los "protooncogenes" ordinarios benignos se transforman en agentes inductores del cáncer debido a la acción de un retrovirus o, más frecuentemente, debido a la exposición a las radiaciones, elementos carcinógenos u otros ataques [véase "Oncogenes", por J. Michael Bishop; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1982].

Física. El premio Nobel de física lo han ganado tres investigadores que desarrollaron métodos de gran precisión para medir el comportamiento cuántico de las partículas. Norman F. Ramsey, de la Universidad de Harvard, recibirá la mitad del premio por haber ideado una técnica que permite conocer el espectro energético de los átomos estimulándolos con campos magnéticos oscilantes; la técnica, probada por primera vez hace 40 años, llevó al desarrollo del máser de hidrógeno (un generador muy estable de radiación electromagnética) y del reloj atómico. Wolfgang Paul, de la Universidad de Bonn, y Hans G. Dehmelt, de la Universidad de Washington, comparten la otra mitad del galardón por haber creado métodos para atrapar y observar átomos y electrones individuales.

¿Vuelve Lamarck?

Hace un año, los biólogos tradicionales se asustaron al creer ver el espectro de Jean-Baptiste Lamarck en un artículo de *Nature*. En el número del 8 de setiembre de 1988, John Cairns y sus colegas de la Escuela de Salud Pública de Harvard presentaron unos resultados que sugerían que, bajo condiciones apropiadas, las células pueden "decidir" mutar en una forma favorable y adaptativa. Esta sugerencia violaba una premisa central de la genética tradicional —la frecuencia de una mutación no depende de su importancia para la supervivencia— y recordaba la teoría desacreditada de Lamarck, formulada en 1809, según la cual las especies evolucionan mediante la transmisión de los caracteres adquiridos. Hasta hace poco, los resultados de Cairns parecían exigir una revisión drástica de la biología molecular. Sin embargo, Bernard D. Davis, de la Facultad de Medicina de Harvard, ha propuesto una explicación alternativa a las mutaciones "dirigidas" que podrá, quizá, salvar los principios de la biología actual.

Según la teoría neodarwinista, que goza de amplia aceptación, las células mutan de forma continua y al azar; luego, la selección natural se encarga de ir eliminando los mutantes menos adaptados. Sin embargo, Cairns sospechó que esta teoría no contaba con suficiente respaldo experimental. El grupo de Cairns estudió una cepa de *Escherichia coli* que había perdido la capacidad de digerir el azúcar lactosa, por culpa de una deficiencia génica. Cuando incubaron dichas bacterias en cultivos de lactosa, observaron que los mutantes se desarrollaban con demasiada frecuencia. Algún proceso desconocido de tipo lamarckiano parecía dirigir las mutaciones de acuerdo con unas pautas adaptativas.

Pocos meses después, se obtuvieron resultados aún más concluyentes sobre la existencia de mutaciones dirigidas; Barry G. Hall, ahora en la Universidad de Rochester, anunció en la revista *Genetics* que había obtenido bacterias mutantes capaces de digerir la molécula salicina en cultivos que contenían esta sustancia. Esta capacidad sólo podía ser el resultado de dos mutaciones específicas, ambas rarísimas, carentes de ventajas manifiestas. Por tanto, las probabilidades de que la capacidad de digestión de la salicina surgiera por casualidad eran casi nulas.

Como era de esperar, estos resultados han desatado una apasionada controversia. Algunos biólogos consideran que Cairns y Hall están equivocados. Otros especulan sobre mecanismos desconocidos que podrían dirigir las mutaciones beneficiosas, posiblemente mediante la síntesis de copias de genes que determinan proteínas de obvio interés. La transmisión de información de las proteínas de nuevo a los genes —proceso inverso al normal: ADN-ARN-proteína— se contrapone a las premisas básicas de la biología.

Davis acaba de presentar una hipótesis alternativa menos revolucionaria: las células malnutridas podrían cometer frecuentes errores durante el proceso de transcripción de su información genética.

En un artículo escrito para los *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Davis sugiere que las células hambrientas devoran sus propias proteínas para conseguir energía. Si destruyen, por ejemplo, las enzimas de reparación del ADN, aumentará la probabilidad de mutación. En la naturaleza, las bacterias están a menudo hambrientas; por ello, Davis sospecha que la malnutrición puede ser un potente vehículo director de los cambios evolutivos.

También señala que, cuando los genes se transcriben para sintetizar proteínas, el ADN de los genes abandona temporalmente su robusta estructura de doble hélice y se transforma en ADN unicatenario. Las secuencias de ADN unicatenario son mucho más vulnerables ante las mutaciones y otras alteraciones; por tanto, los genes activos podrían mostrarse más propensos a mutar que los genes en reposo. Davis interpreta los resultados de Cairns del siguiente modo: la lactosa provoca la separación de las dos hebras de la doble hélice de parte de los genes defectuosos de la bacteria, propiciando así las mutaciones relacionadas con la digestión de la lactosa.

El debate sobre el origen de las mutaciones no ha hecho más que empezar. Cairns insiste en que sus resultados experimentales descartan la teoría de Davis; también cuestiona el mecanismo que éste propone porque se basa en la hipótesis no demostrada de que los ge-

nes son más propensos a la mutación durante su transcripión. Por doquier se proponen mecanismos alternativos. ¿Resucitará a Lamarck la biología celular? El futuro lo dirá.

Conciencia cuántica

Roger Penrose es hombre de figura leve y maneras amables; habida cuenta de que acaba de proponer de qué forma podría funcionar el universo entero —sin olvidar la enigmática conciencia humana—, resulta ser un conductor curiosamente apocado. En la travesía desde el aeropuerto, en las afueras de Syracuse (estado de Nueva York), hasta la universidad de esa ciudad, frena en todos los cruces, mirando con el rabillo del ojo todos los indicadores, como si sus mensajes fueran mensajes sánscritos. ¿Por dónde se irá?, se pregunta, disculpándose por su indecisión. Da la impresión de hallarse empantanado en misterios.

Cuando al fin llegamos a su despacho, Penrose se encuentra sobre una mesa un envase de "spray" rotulado "Supercuerda". Ahoga una risita al verlo. Sobre la cuestión de las supercuerdas —no los filamentos de espuma que dispara el novedoso chisme, sino las partículas de inimaginable pequeñez que, según algunos científicos, pudieran subyacer a la totalidad de la materia— Penrose tiene ideas claras. Las encuentra demasiado desgarbadas y bastas. "La verdad, no es así como espero que sea la respuesta", comenta con suave acento británico.

Cuando Penrose dice "la respuesta", imagina uno las palabras escritas con mayúsculas. Confiesa estar de acuerdo con Platón en que la verdad se encarna en las matemáticas y tiene existencia "externa", independiente del mundo físico e incluso del pensamiento humano. Los científicos no inventan la verdad, la descubren. Un descubrimiento genuino debe ir mucho más allá de la mera acomodación a los hechos: debería producir una impresión correcta, debería ser hermoso. En este sentido, el sentir de Penrose es un tanto parejo al de Einstein, quien al juzgar la validez de las proposiciones sobre el mundo se preguntaba: ¿Es así como Dios lo haría? "Las cualidades estéticas son importantes en la ciencia", afirma Penrose, "y necesarias, me parece, para la ciencia que importa."

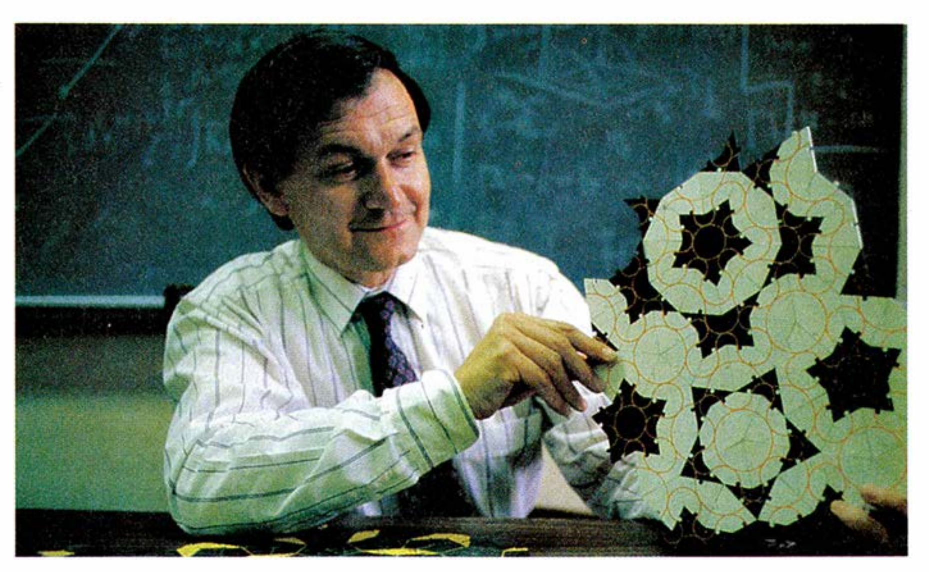
Entrevisté a Penrose en septiembre, cuando visitó la Universidad de Syracuse, en licencia temporal de su cátedra en Oxford. A los 58 años, es uno de los físicos o matemáticos más eminentes del mundo (no consigue decidir a qué categoría prefiere ser adscrito). Es "un maestro", al decir del distinguido físico John D. Wheeler, de la Universidad de Princeton, en sacar partido de "la magnífica potencia de las matemáticas para penetrar en todo".

Fue un logro en astrofísica lo que dio a Penrose su fama primera. Durante el decenio de 1960, colaboró con Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, en la demostración de que las singularidades —objetos tan aplastados por su propio peso que su densidad llega a ser infinita, más allá de los dominios de la física clásica— no sólo son posibles, sino inevitables en ciertas circunstancias. Dicho trabajo contribuyó a llevar a los agujeros negros desde los confines exteriores de la astrofísica hasta su centro.

La sempiterna pasión de Penrose por los rompecabezas geométricos dio fruto en el decenio de 1970. Descubrió que bastan dos figuras geométricas, ensambladas como en los rompecabezas, para pavimentar aperiódicamente una superficie plana, creando motivos que jamás se repiten. "En pequeña medida, estaba pensando en cómo podría suceder que estructuras sencillas impusieran disposiciones complicadas", dice Penrose, "pero, sobre todo, me dediqué a ello por diversión". Las piezas, llamadas teselas de Penrose, fueron tenidas al principio por una mera curiosidad, sin relación con los fenómenos naturales. Más tarde, en 1984, un investigador de la Oficina Nacional de Normalización y Certificación, descubrió una sustancia cuya estructura molecular se asemeja a una teselación de Penrose. Esta nueva forma de materia sólida, los cuasicristales, se ha convertido en uno de los principales focos de investigación de materiales [véase "Cuasicristales", por David R. Nelson, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1986].

Los cuasicristales, las singularidades y prácticamente todas las rarezas y curiosidades a las que Penrose ha dedicado sus reflexiones figuran en su actual "opus magnum", titulado *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*, recién publicado por Oxford University Press. Ostensiblemente, el propósito del libro es refutar la tesis de ciertos entusiastas de la inteligencia artificial, según la cual, los ordenadores llegarán un día a hacer todo cuanto puedan hacer los cerebros humanos, y más aún. Empero, el lector pronto se percata de que Penrose se ha marcado una meta mucho más ambiciosa: nada menos que señalar la vía hacia una gran síntesis de la física clásica, la física cuántica e, incluso, la neuropsicología.

Comienza su argumentación desdeñando la presunta capacidad de los ordenadores para remedar los pensamientos de los matemáticos. A primera vista, los ordenadores podrían parecer perfectamente idóneos para tal empresa; después de todo, fueron creados para calcular. Pero Penrose señala que el propio Alan M. Turing, el primer paladín de la inteligencia artificial, demostró ya que muchos problemas matemáticos no son susceptibles de análisis y resolución por medios algorítmicos. Los límites de la computabilidad, añade Penrose, están relacionados con el teorema de Gödel, teorema que sostiene que en todo sistema matemático existen proposiciones verdaderas que son indemostrables a partir de los axiomas iniciales del sistema. La mente



1. Roger Penrose sostiene una teselación que lleva su nombre, compuesta por dos formas geométricas que generan motivos aperiódicos. La foto fue tomada por Stephen Sartori.

humana puede comprender dichas verdades, pero un ordenador, atado a reglas, no.

¿En qué sentido, pues, se diferencian mente y ordenador? Penrose opina que la respuesta podría tener que ver con la física cuántica. A nivel cuántico, la conducta de un sistema (un grupo de átomos de hidrógeno, por ejemplo) no cursa unívocamente, no admite uno, sino cierto número de posibles estados que, de alguna forma, se "superponen" unos a otros. Sin embargo, cuando un físico mide el sistema, todos los estados superpuestos se desploman y confunden en uno solo; parece como si hubiera tenido lugar sólo una de las posibilidades. A Penrose, esta aparente dependencia de la física cuántica con respecto a la observación humana, amén de su incompatibilidad con los sucesos macroscópicos, le resulta profundamente insatisfactoria. Si la imagen cuántica de la realidad fuese absolutamente correcta, sugiere, no deberíamos ver una única bola de cricket en reposo sobre el césped, sino un manchón borroso, formado por muchas bolas sobre muchos céspedes.

Penrose propone que una fuerza llamativamente ausente en la física cuántica, a saber, la gravedad, podría establecer el nexo entre el reino cuántico y el mundo clásico, determinista, en el que moramos nosotros los humanos. En sí misma, esta idea no es nueva. Muchos físicos teóricos han buscado dar una teoría cuántica de la gravitación, incluidos quienes se esfuerzan en tejer con supercuerdas el entramado de lo real. Pero Penrose toma aquí una vía distinta. Hace notar que, a nivel cuántico, la evolución en el tiempo de los diversos estados superpuestos de un sistema hace que la distribución de materia y energía entre ellos comience a hacerse divergente. A un cierto nivel, intermedio entre los reinos cuántico y clásico, las diferencias entre los estados superpuestos comienzan a adquirir importancia gravitatoria; los estados se desploman entonces en el único estado que los físicos pueden medir. Visto así, es la influencia gravitatoria del aparato de medida —y no la presencia abstracta de un observador— la responsable del desplome de la superposición de estados.

La gravitación cuántica penrosiana puede contribuir también a dar cuenta de los llamados efectos no locales, efectos en los que acontecimientos de una región afectan simultáneamente a los sucesos de otra. El famoso experimento conceptual de Einstein-Podolsky-Rosen fue el primero en indicar cómo podrían tener lugar efectos no locales: si al desintegrarse una partícula emite simultáneamente fotones en direcciones opuestas, la medición del espín de uno "fija" instantáneamente el espín del otro, aunque se encuentre a una distancia de años-luz.

Penrose cree que en los cuasicristales pueden intervenir también efectos no locales. Los cristales ordinarios —explica— crecen secuencialmente, a razón de un átomo por vez; la complejidad de los cuasicristales sugiere un fenómeno de carácter más global: cada átomo parece percibir lo que está haciendo cierto número de otros átomos cuando van cayendo concertadamente en su lugar. El proceso se asemeja al requerido para ir colocando las teselas de un pavimento de Penrose: con frecuencia, la adecuada colocación de una tesela depende de cómo estén dispuestas otras piezas ubicadas a varias losetas de distancia.

¿Y qué relación guarda todo esto con la conciencia humana? Penrose propone que los procesos fisiológicos subyacentes a un pensamiento dado pueden comportar una cierta superposición de estados cuánticos, cada uno de los cuales efectúa una especie de cálculo preliminar. Cuando las diferencias en la distribución de masa y energía entre los estados alcanza un nivel con significado gravitatorio, los estados se desploman y confunden en un único estado, provocando cambios mensurables y probablemente no locales en la estructura neural del cerebro. Este acontecimiento físico está correlacionado con otro mental: la comprensión de un teorema matemático, pongamos por caso, o la decisión de dar o no propina al camarero. Lo importante a recordar, dice Penrose, es que este proceso cuántico no puede reproducirse con ninguno de los ordenadores hoy concebidos.

Con humildad aparentemente sin doblez, Penrose recalca que estas ideas no merecen recibir aún el nombre de teorías, y prefiere llamarlas "sugerencias". Pero su conversación y sus escritos parecen dar a entender su convicción de que, algún día, los humanos (no los ordenadores) descubrirán la respuesta definitiva a todo. ¿Está de verdad Penrose convencido de ello? Penrose dedica al asunto un momento de reflexión. "Me parece que bastante", dice por fin, "aunque tal vez sea demasiado pesimista." ¿Por qué pesimista? Acaso no es esa la esperanza de la ciencia? Responde Penrose: "Resolver misterios, o esforzarse por lograrlo, es algo maravilloso; si todos estuvieran resueltos, este mundo sería bastante aburrido".

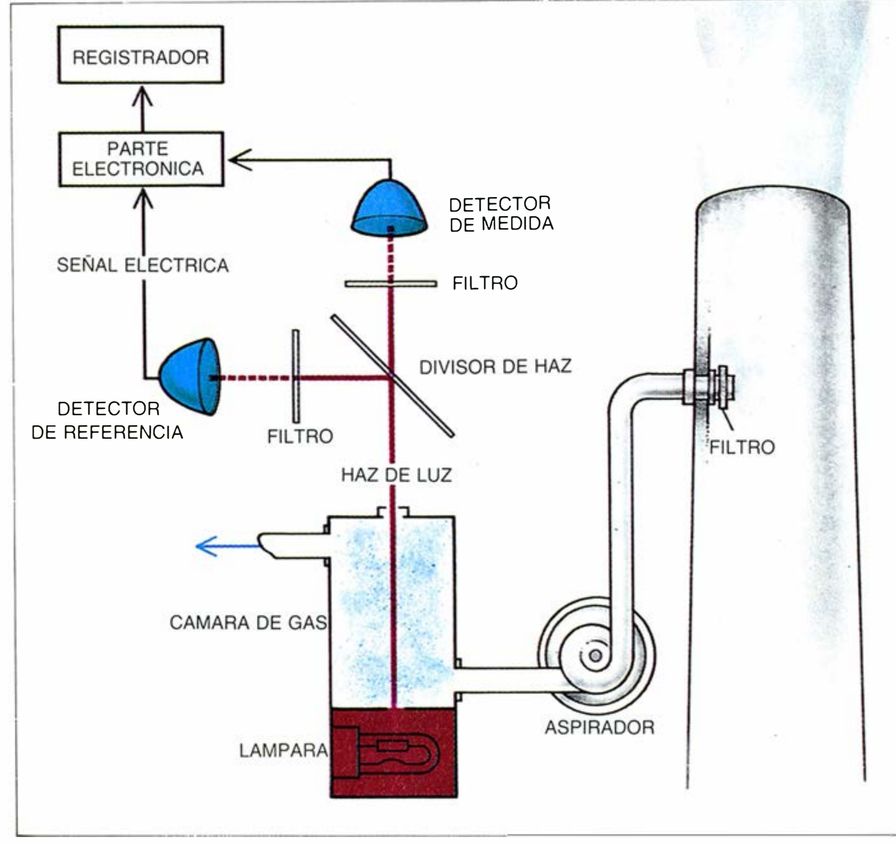
Ciencia y empresa

Eléctricas y contaminantes

En la orilla del río Ohio se alza la central térmica General James M. Gavin. Es la mayor de Ohio: consume alrededor de 5,6 millones de toneladas de carbón por año y produce más de 12.500 millones de kilowatt-hora de electricidad. La central posee también otra característica: es el mayor emisor en los Estados Unidos de dióxido de azufre, producto que contribuye de forma decisiva a la lluvia ácida.

En el mes de julio, el presidente Bush dio a conocer un plan para reducir las emisiones anuales de dióxido de azufre en 10 millones de toneladas para fines del año 2000. El Congreso parece de acuerdo con el objetivo que, según William K. Reilly, administrador de la Oficina de Protección Ambiental (EPA), debería "invertir el proceso de degradación de nuestros lagos y ríos". Para lograr tal objetivo, la administración ha recurrido a una política largo tiempo defendida por los economistas: conceder "derechos de contaminación" que permitieran a los poseedores emitir cantidades especificadas de contaminantes. Las empresas podrían entonces comprar, vender y alquilar esos derechos. En teoría, tal enfoque debería satisfacer las normas de contaminación al mínimo coste.

Hasta ahora, EPA ha presentado sólo las grandes líneas del proyecto. Los principales participantes del programa serán las compañías eléctricas que poseen centrales de carbón; producen éstas, aproximadamente, los dos tercios de las emisiones totales de dióxido de azufre en los EE.UU. (El tercio restante corresponde a una variada gama de instalaciones industriales.) La EPA concederá en un comienzo permisos anuales de contaminación a las centrales grandes: unas 107 en veinte estados de la Unión. A cada central se le concederá, a buen seguro, un cupo demasiado bajo para cubrir su nivel actual de emisiones; por ello, se verá obligada a reducirlas o a comprar los derechos de otras empresas que no los necesiten, por haber éstas reducido sus emisiones por debajo del cupo. Habrá, además, un número limitado de permisos, razón por la cual hasta las centrales más sucias encontrarán, con el tiempo, demasiado cara la compra de derechos.



1. MONITOR CONTINUO DE EMISIONES, que mide los porcentajes de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno en los efluentes de una central térmica. El gas de la chimenea se aspira hasta una cámara, donde ha de cortar un haz infrarrojo o ultravioleta. El haz, dividido en dos, se dirige a sendos detectores, uno de los cuales es sensible a una longitud de onda de referencia y el otro a una longitud de onda que los contaminantes absorben. El cociente de las intensidades de las dos longitudes de onda indica la concentración del contaminante.

El primer plazo que tienen esas empresas para ajustar sus emisiones a su concesión termina en enero de 1996. En esta primera fase, las concesiones limitarán las emisiones al equivalente a 1,2 kilogramos de dióxido de azufre por cada mil millones de megajoule térmicos generados por las instalaciones en 1985. Para enero del año 2001, la EPA habrá restringido su concesión anual de permisos, limitando las emisiones a 0,57 kg de SO_2 por mil millones de megajoule y habrá incluido más centrales en el programa. En ese punto, la emisión anual total de las centrales deberá haberse reducido a unos nueve millones de toneladas. La EPA afirma que no permitirá que esa cifra suba, aun cuando lo haga la demanda de electricidad. Las instalaciones nuevas tendrán que comprar concesiones de las ya existentes antes de poder emitir un gramo de SO_2. Y no se permitirá aumentar su tasa de emisión a los contaminadores de bajo nivel.

Cada instalación deberá pasar una minuciosa inspección antes de entrar en el programa de concesiones. Sin embargo, una vez aceptada, no necesitará permiso de la EPA para comprar o vender cuotas. (Hasta el año 2001, sólo se permitirá a las instalaciones tratar con las del mismo estado o sistema; después, podrán hacerlo con cualquier instalación dentro del programa de reducción de emisiones.) Así, si la cental Gavin de Ohio estuviera de acuerdo en vender o alquilar 500 cuotas a Tanners Creek, otra central del mismo consorcio en Indiana, ambas acordarían los términos y enviarían una carta a EPA anunciando la operación. La EPA consultaría una base informática de datos para asegurarse de que la central Gavin tenía 500 cuotas para vender; después acreditaría la operación.

El programa de compraventa espolearía a las empresas que pueden fácilmente reducir sus emisiones a hacerlo y vender las cuotas sobrantes a aquellas otras para las que reducir sus emisiones resulta más caro que comprar cuotas. En consecuencia, la EPA estima que, si las empresas actúan agresivamente en sus compraventas, el coste del programa —que se estima en 4000 millones de dólares— podría disminuir en un 20 por ciento.

Para elaborar los detalles, la EPA se guiará por las duras lecciones del haz de programas de compraventa ya existentes. California lanzó, en 1979, un programa para emisiones de compuestos orgánicos volátiles, de los que producen la bruma fotoquímica, y otros contaminantes, que se ha convertido en una ciénaga burocrática. Cualquier empresa nueva o ampliada que vaya a emitir niveles apreciables de tales compuestos debe adquirir cuotas de empresas ya existentes. Pero los organismos locales deben aprobar cada compraventa, caso por caso. La EPA sostiene que su sistema será mucho más ágil, ya que no piensa entretenerse revisando cada contrato.

Desde el punto de vista administrativo, un programa de compraventa en el que empresas distintas están obligadas a cumplir normas diferentes de emisión puede complicar la labor de vigilancia. Para asegurarse de que las centrales térmicas no emiten más dióxido de azufre del que sus cuotas permiten, la EPA instalará en las chimeneas instrumentos de vigilancia continua de las emisiones. Aunque hay muchos modelos, la mayoría hacen pasar radiación infrarroja o ultravioleta a través de los gases de salida y miden la disminución resultante en las longitudes de onda absorbidas por el dióxido de azufre.

Que las empresas hagan o no buen uso de sus privilegios de compraventa dependerá de muchos factores ajenos a la estructura del programa. Las empresas podrían, por otro lado, resistirse a negociar cuotas si la administración no cambia los reglamentos. Las empresas eléctricas aducen, asimismo, que el techo de las emisiones limitará la negociación, porque incita al acaparamiento de cuotas. Si temen escasez de éstas para centrales nuevas o ampliadas, las empresas se negarán a venderlas, afirman representantes del sector eléctrico. La EPA responde que, aunque puede haber cierta escasez de cuotas a comienzos del próximo decenio, hacia el año 2010 habrán cesado de funcionar centrales antiguas en número suficiente para garantizar abundancia de cuotas de las instalaciones más limpias.

El poder legislativo tiene ante sí un rosario de cuestiones que resolver en relación con el suministro energético. ¿Debe el programa extenderse más allá del sector eléctrico? ¿Deben asegurarse los puestos de trabajo de los mineros de carbón con alto contenido de azufre? ¿Deben endurecerse las medidas restrictivas de emisiones de óxidos de nitrógeno? ¿Debe concederse un trato de favor a las empresas que inviertan en procedimientos de carbón limpio? La propia noción de negociar derechos de contaminación se halla, para algunos, en entredicho: que el gobierno dé "permiso" para contaminar equivale a conceder vía libre al tráfico de una mercancía moralmente objetable.

Redes que funcionan

El campo de los ordenadores de red neural, cuyos procesadores múltiples (reales o simulados) modifican mutuamente sus resultados finales, está lejos de haber alcanzado la madurez. Inspirado en la arquitectura del sistema nervioso, ese dominio emplea una terminología confusa con discusiones sinfín sobre las posibilidades de las varias arquitecturas en competencia. Lo que no ha sido obstáculo para la aparición de empresas que aplican la circuitería neural a los problemas de la vida real. "Quizás haya gente ganando dinero [con los circuitos neurales] antes de que los científicos sepan si son o no posibles", predice Paul J. Werbos, de la Fundación Nacional de la Ciencia.

A diferencia de los ordenadores típicos, las redes neurales llegan a una respuesta por aproximaciones o generalizaciones basadas en pocos datos. Parecen, pues, idóneos para la solución de problemas relativos a la identificación de configuraciones o procesado de señales, cuestiones frecuentemente demasiado nebulosas para abordarlas mediante los habituales algoritmos de cálculo. Se están usando ya redes sencillas para corregir distorsiones de señal en líneas telefónicas variables; con el tiempo, podrían emplearse para asir objetos orientados al azar en cadenas de montaje.

Los sistemas complejos acometen esos problemas combinando, al menos, dos redes que actúan de acuerdo con la técnica de retropropagación: se compara la salida real de una red con la salida deseada, y la discrepancia sirve de base para modificar las interacciones entre las "neuronas" en orden a mejorar el ajuste. El sistema aprende a adaptarse a las condiciones.

La estructuración de clases en una línea aérea proporciona un ejemplo de esa tarea: las plazas en un vuelo pasan de una clase a otra, a medida que se producen las ventas, a fin de obtener el máximo provecho. Las primeras reservas permiten prever la evolución de la demanda de un vuelo y, a partir de ella, la distribución óptima de plazas más baratas y más caras. Pero los pasajeros de una u otra clase tienden a hacer sus reservas en momentos distintos; además, los vuelos en ciertas épocas, en vacaciones por ejemplo, atraen más reservas muy adelantadas en busca de precios con descuento.

Según William R. Hutchison, de BehavHeuristics, un sistema basado en varias redes neurales interactivas, cada una con una tarea diferente, puede superar los enfoques estadísticos tradicionales de distribución de plazas, ya que se adapta continuamente al comportamiento de la demanda. Nationair, en Montreal, ya usa el paquete de programas de BehavHeuristics para su distribución de plazas, y otras líneas aeronáuticas están haciendo pruebas. (Como la mayoría de las redes de hoy, el sistema de BehavHeuristics es, en realidad, un programa que simula una red neural en un ordenador corriente.)

Problemas similares, pero que exigen decisiones más rápidas, son los que han de resolver los proyectistas de pilotos automáticos. Neural Systems, de Vancouver, ha desarrollado un autopiloto simplificado que está aprendiendo a controlar reactores de altas prestaciones. Para obtener una respuesta dada del avión —por ejemplo, el vuelo de crucero—, el sistema compara la respuesta deseada con el comportamiento real de la nave; mediante la retropropagación, aprende cuáles son los ajustes a aplicar a los mandos. Cuando la red ha aprendido la respuesta del avión, puede manejar los mandos y prescindir de la retropropagación.

Otras compañías han comenzado a mirar con interés la aplicación de las redes; verbigracia, el auxilio que podrían prestar a los controladores de tráfico aéreo en la comprobación de que los aviones que se están acercando a un aeropuerto o a un portaaviones siguen la calle correcta. Se está también desarrollando sistemas de reconocimiento de configuraciones que faciliten la identificación del tipo de avión en el radar.

Los partidarios de las redes neurales hablan de las posibilidades de las mismas en el progreso de la robótica, donde podrían reducir la cantidad de cálculos necesarios para la solución del "problema de dinámica inversa": controlar los actuadores del brazo de un robot de manera que su "mano" acabe en el punto correcto. Aunque el problema es sencillo en su estructura teórica, el tiempo que los ordenadores necesitan para su solución puede limitar las prestaciones del robot y conducir a movimientos ineficaces y espasmódicos. Josin ha demostrado ya cómo las redes neurales, empleando la retropropagación, pueden aprender las transformaciones geométricas necesarias a partir de unos pocos ejemplos y generalizar este conocimiento para ajustarse a nuevas situaciones.

El calcio, mensajero intracelular

La concentración intracelular de calcio se ha considerado generalmente como un interruptor de encendido y apagado de los procesos celulares. Sin embargo, la función de este ion en las respuestas prolongadas contradice el modelo tradicional

Howard Rasmussen

Dos de los fenómenos más notables que tuvieron lugar en el curso de la evolución fueron el desarrollo del exoesqueleto de los moluscos y, cientos de millones de años después, el endoesqueleto óseo de los animales superiores. Cada avance representó un nuevo uso biológico del calcio. En la formación de conchas, huesos y dientes, las sales de calcio son materiales familiares de la bioarquitectura y signos visibles de la importancia del ion en el crecimiento y actividad de los organismos.

En cambio, se conoce mucho menos otra función, más antigua y universal, del ion calcio: en una gran variedad de células animales, el calcio actúa a modo de mensajero iónico casi universal, transmitiendo las señales recibidas en la superficie celular a los procesos intracelulares. Y está implicado en procesos muy dispares: regulación de la contracción muscular, secreción de hormonas, enzimas digestivas y neurotransmisores, transporte de sales y agua por el epitelio intestinal y control del metabolismo del glucógeno en el hígado.

Mientras que la calcificación que produce el hueso supone la acumulación ordenada de grandes cantidades de sales, el desempeño de mensajero intracelular requiere pequeños flujos de iones calcio a través de las membranas celulares. De hecho, el ion calcio sólo puede llevar a cabo su función como mensajero intracelular a concentraciones muy bajas y estrechamente controladas: las altas concentraciones van en detrimento del normal funcionamiento de las células.

Las células poseen un conjunto de mecanismos, sencillo y elegante, por el que regulan la concentración intracelular de calcio. Los mecanismos funcionan, principalmente, mediante el control del movimiento de los iones calcio a través de tres membranas: la membrana plasmática, que circunda la célula; la membrana interna de la mitocondria, orgánulo celular productor de energías, y la membrana de los compartimientos que almacenan calcio, denominados retículo sarcoplasmático en las células musculares y calcisomas en células no musculares. Aunque la concentración intracelular de calcio permanece bastante constante, su flujo a través de la membrana (cantidad que entra y sale) puede variar significativamente.

Se acaba de comprobar que este "reciclaje" de iones calcio a través de la membrana plasmática forma parte de la compleja cadena de fenómenos por los que las células generan respuestas continuas ante estímulos extracelulares. La función del calcio en respuestas celulares sostenidas, tales como la secreción de insulina o la contracción del músculo liso de las paredes de los vasos, ha resultado históricamente más difícil de estudiar que la que realiza en respuestas transitorias, tales como la contracción del músculo esquelético. Mis colegas y yo hemos hilvanado un esquema coherente para explicar cómo el reciclaje de calcio a través de la membrana plasmática media las respuestas celulares continuas, o sostenidas. En tres diferentes sistemas celulares hemos encontrado mecanismos semejantes. Nuestras observaciones nos han permitido una comprensión más rica del ion calcio como mensajero intracelular que la que se tenía hace apenas cinco años.

La sensibilidad de la célula a muy pequeñas variaciones de la concentración de calcio se explica por la concentración intracelular del ion, que es muy baja. La concentración del calcio en el medio que rodea a las células suele ser unas 10.000 veces superior a la del medio intracelular, o citosol. El mantenimiento de esta diferente concentración depende de dos propiedades de la membrana plasmática: su baja permeabilidad al calcio y la presencia de "bombas" que translocan calcio al exterior de las células en contra de un gradiente de concentración. En condiciones basales, la velocidad de filtración o entrada del calcio en las células queda contrarrestada por la de bombeo hacia el exterior.

La clásica señal del calcio

Cuando se estimula una célula por una señal extracelular, se abren canales de la membrana plasmática y penetra el calcio en las células con una velocidad de dos a cuatro veces superior a la basal. Tales canales permiten que el calcio, pero no otros iones, fluyan hacia el interior de la célula. Algunos canales se abren cuando el neurotransmisor cambia la diferencia de potencial eléctrico que normalmente existe a través de la membrana; otros se abren cuando la hormona o el neurotransmisor interacciona con un receptor de membrana celular asociado a los canales.

El concepto tradicional del calcio como segundo mensajero es bastante sencillo. La estimulación por una hormona o un neurotransmisor aumenta la concentración citosólica del calcio, bien por la apertura de los canales de calcio de la membrana o por la liberación de calcio del retículo sarcoplasmático o de los calcisomas. Cuando la concentración aumenta, proteínas citosólicas que ligan calcio, tales como el

HOWARD RASMUSSEN es catedrático de medicina interna y de fisiología celular y molecular de la facultad de medicina de la Universidad de Yale. A lo largo de su vida ha mantenido un gran interés por el estudio del metabolismo del calcio en el hombre y ha publicado cientos de artículos y un libro sobre el calcio como mensajero. En 1959 Rasmussen se doctoró en la Universidad de Rockefeller. Antes de trasladarse a la Universidad de Yale, en 1976, trabajó en la facultad de medicina de las universidades de Wisconsin y Pennsylvania.

receptor específico calmodulina, se unen a los iones calcio; a continuación, los complejos calcio-proteína interactúan con otras proteínas celulares y alteran la función celular. Cuando la concentración citosólica de calcio disminuye de nuevo, los iones se disocian de las proteínas receptoras y el sistema se desactiva.

En ese marco, el calcio viene a ser un simple interruptor de encendido y apagado, que transmite información desde la superficie celular hasta el interior de la célula. La verdad es que el calcio funciona como tal interruptor en diversas respuestas celulares transitorias, incluyendo la secreción de neurotransmisores por las células nerviosas y la contracción de las fibras de músculo esquelético y cardiaco. En todos los casos, el aumento de la concentración citosólica de calcio inicia la respuesta y su disminución la acaba.

Un primer grado de complejidad

Mientras se desarrollaba el diseño del modelo precedente para explicar la acción del calcio como segundo mensajero, se propuso un modelo similar para otras moléculas mensajeras conocidas como monofosfatos de adenosina cíclicos (AMPc). Se pensó que la síntesis de AMPc en la membrana plasmática y su degradación en el citosol constituían un sistema de encendido y apagado semejante al que representa las variaciones en la concentración de calcio. Inicialmente se consideraba que los dos sistemas (calcio y nucleótidos cíclicos) operaban de forma independiente.

En la actualidad, sin embargo, se cree que el AMPc y el calcio colaboran, por lo común, en la regulación del comportamiento celular. Por ejemplo, el AMPc puede controlar la velocidad de reciclaje del calcio a través de la membrana plasmática, y el calcio puede regular las enzimas responsables de la síntesis y degradación del AMPc. Una única hormona que actúe sobre un único receptor puede fomentar, a la vez, la entrada de calcio y la síntesis de AMPc.

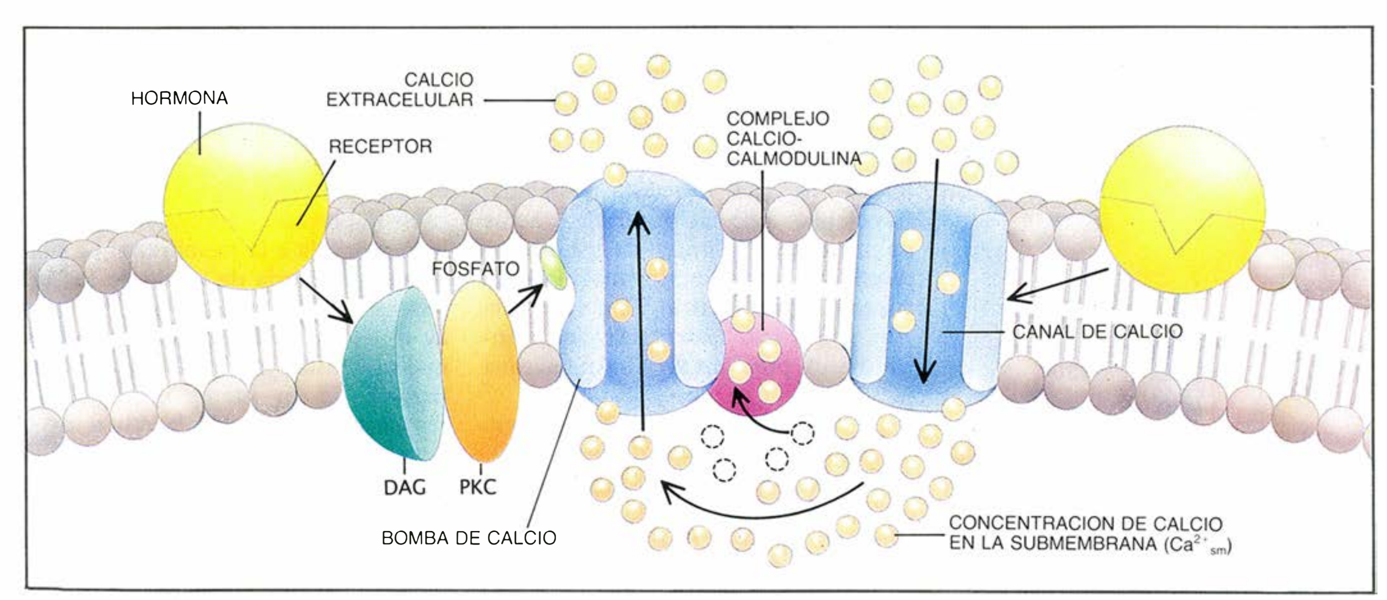
Finalmente, tanto el calcio como el AMPc llevan a cabo muchos de sus efectos celulares controlando la actividad de una clase particular de enzimas: las quinasas. Estas proteínas catalizan la transferencia de grupos fosfato desde la molécula denominada trifosfato de adenosina (ATP) hacia otras proteínas. La adición de un grupo fosfato modifica la función de la proteína; de hecho, se piensa que la fosforilación generalizada de proteínas determina los cambios en el comportamiento celular inducidos por algunas señales extracelulares.

La imagen que se tenía de la función del calcio y AMPc como mensajeros individuales también ha cambiado. La consideración de que los iones calcio y el AMPc se comporten como meros interruptores no se puede mantener en todos los contextos. En particular, dicho paradigma no puede explicar cómo las células responden de forma ininterrumpida a la presencia continua de mensajeros extracelulares.

Mis colegas y yo nos hemos centrado en el estudio del papel del ion calcio en las respuestas celulares continuas, o sostenidas. Hemos estudiado tres respuestas de este tipo: la secreción de la hormona aldosterona (que regula el metabolismo del potasio) por las células de la capa glomerular de las glándulas adrenales; la secreción de insulina por las células de los islotes de Langerhans del páncreas, y la contracción de las células del músculo liso que rodean la tráquea y numerosos vasos sanguíneos. A pesar de las notables diferencias en la naturaleza de estas respuestas y de las señales extracelulares que las originan, hemos observado que en los tres tipos celulares el ion calcio cumple, de manera similar, su función de mensajero.

Un segundo grado de complejidad

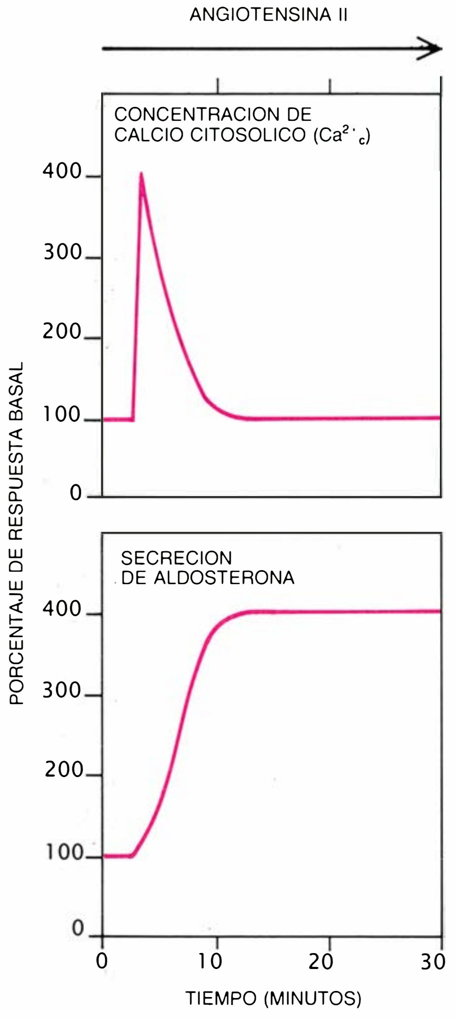
Hasta hace pocos años creíase que las respuestas celulares continuas, que dependían del calcio, eran el resultado de un aumento sostenido, más que transitorio, de la concentración citosólica de iones calcio. Esta idea no se apoyaba en medidas directas de concentración citosólica de calcio. Antes bien, fundábase en la convicción de que el calcio actuaba de forma similar al AMPc, que sufre un aumento sostenido de concentración en respuesta a estímulos apropiados. Sin embargo, cuando se midió la concentración citosólica del ion calcio en células estimuladas se observó que, aunque tal como se esperaba la concentración del ion



1. AUTORREGULACION del flujo de calcio a través de la membrana plasmática. Se consigue controlando las bombas de calcio. Cuando una hormona interacciona con su receptor, aumenta la entrada de calcio a través de los canales de la membrana (*derecha*). Una mayor concentración de calcio en la submembrana (Ca^{2+}_{sm}) activa la calmodulina, proteína secrestadora de calcio, y la quinasa proteica C (PKC), que estimula la intervención de la bomba de calcio (*izquierda*). El flujo de salida de calcio compensa así su entrada. El aumento submembranal del calcio constituye un nuevo tipo de mensajero.

calcio aumentó, el incremento fue sólo transitorio, y a continuación disminuyó hasta sus valores basales en unos pocos minutos, si bien la respuesta celular persistió durante horas.

Esta paradoja nos obligó a reconsiderar el clásico punto de vista de la función del calcio como segundo mensajero. Así, pues, mis colegas Itaru Kojima, Kumiko Kojima, William J. Apfeldorf y Paula Q. Barrett profundizaron en el estudio de las alteraciones del metabolismo del ion calcio, en las células glomerulares de las glándulas adrenales, provocadas por la hormona angiotensina II —el desencadenante de la secreción de aldosterona. Observamos que en estas células la angiotensina II sólo aumentaba transitoriamente la concentración citosólica de calcio, mientras que la entrada de calcio se incrementó dos veces y de forma sostenida.



2. DISOCIACION temporal de los cambios en la concentración del ion calcio (*arriba*) y la respuesta celular (*abajo*): no se puede predecir ese fenómeno por el clásico modelo del calcio como mensajero. Estos datos describen la secreción de la hormona esteroidea aldosterona por las células de la capa glomerular de la glándula suprarrenal en respuesta a la hormona angiotensina II. Un minuto después de la adición de angiotensina II, la concentración de calcio en el citosol, o fluido intracelular, aumenta transitoriamente, pero la secreción de aldosterona se mantiene durante más de 30 minutos.

Esta observación presentó una segunda paradoja. Se pensaba que un aumento sostenido en la entrada de calcio incrementaría de forma persistente la concentración citosólica de calcio, pero claramente ése no era el caso. También se suponía que un aumento sostenido en la entrada de calcio determinaría un aumento en el contenido celular total de calcio; no encontramos tal incremento. Por tanto, concluimos que, durante la fase continua de la respuesta de las células adrenales, la angiotensina II provoca un aumento continuo del reciclaje de calcio a través de la membrana plasmática.

Las bases moleculares de esta notable habilidad de la membrana plasmática se localizan en las propiedades de la bomba de calcio. Se ha observado que esta bomba se activa por el complejo calcio-calmodulina. Cuando los niveles citosólicos de calcio aumentan, el complejo interacciona con la bomba y aumenta tanto su eficacia como su sensibilidad a los iones calcio. El rendimiento de la bomba se eleva todavía más cuando es fosforilada por una quinasa activada por calcio: por la llamada proteína quinasa C (PKC). La estimulación de la bomba, por el complejo calcio-calmodulina y por la fosforilación activada por calcio, permite que la salida de calcio compense el incremento del flujo de entrada.

Una vez descubierto el cambio en la velocidad del reciclaje de calcio y definido el mecanismo por el que ocurre, mis colegas y yo exploramos la posibilidad de que el reciclaje sirva de mensajero durante la respuesta celular continua. Encontramos que si bloqueábamos el aumento en el reciclaje de calcio, la respuesta era transitoria y no sostenida. En otras palabras, el reciclaje de calcio es crítico para el mantenimiento de una respuesta sostenida. Concluimos que dicho reciclaje actúa de mensajero porque determina un cambio en la concentración del ion calcio en una parte restringida de la célula —en el dominio "submembrana", dentro o justo por debajo de la membrana plasmática.

La siguiente cuestión a abordar era la relativa a la actuación del mensajero. Observamos que un simple aumento en el flujo de entrada de calcio no bastaba para provocar una respuesta. Por tanto, un aumento en el reciclaje de calcio es necesario, aunque no suficiente, para desencadenar la respuesta continua. Quedó patente que, para descifrar el mensaje del ion calcio y convertirlo en una señal que pueda afectar el reposo de la célula, se requería también un "transductor" asociado a la membrana plasmática, sensible al calcio. Se han encontrado varias moléculas transductoras de este tipo en las células adrenales y en otros tipos de células, pero la que nos interesa aquí es la quinasa C —que es, casualmente, la misma enzima que regula la actividad de la bomba de calcio.

La activación de la PKC, que le permite actuar como transductor de la señal continua de calcio localizada en la submembrana, está asociada al metabolismo de los fosfolípidos de inositol. El metabolismo de estas moléculas está regulado por cierta clase de hormonas y neurotransmisores [véase "Base molecular de la comunicación intracelular" por Michael J. Berridge; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1985]. Cuando uno de estos agentes se une a su receptor, una enzima ligada al receptor cataliza la degradación del fosfatidilinositol 4,5-bifosfato (PIP_2), que es un componente de la membrana celular. La reacción produce inositol-1,4,5-trifosfato (IP_3) y diacilglicerol (DAG). La liberación al citosol de IP_3 libera iones de calcio de los calcisomas. Los iones calcio liberados por este mecanismo provocan un aumento transitorio en la concentración citosólica de calcio. El aumento promueve la formación de complejos de calcio-calmodulina, los cuales activan ciertas quinasas, que a su vez fosforilan un subgrupo específico de proteínas.

Una respuesta de doble filo

El aumento transitorio de calcio, junto con el del DAG, el otro producto de la hidrólisis del PIP_2, hacen que la PKC se asocie con la membrana plasmática. A diferencia del IP_3, el DAG permanece en la membrana, y mientras el contenido de DAG de la membrana persista elevado, la PKC seguirá también asociada a la membrana. La liberación transitoria de calcio de los calcisomas y la emigración de la PKC desde el citosol hacia la membrana plasmática constituyen los fenómenos distintivos de la etapa inicial de la respuesta sostenida de la célula a una determinada señal extracelular.

La activación del receptor también duplica el flujo de entrada de calcio por la membrana plasmática. El mecanismo por el que se aumenta esta entrada, así como el tipo de canales de calcio que se abren, varían de un tipo celular a otro. No está claro todavía si el aumento en la entrada de calcio es el re-

sultado directo de la activación del receptor o lo es de una señal generada por la hidrólisis del PIP_2. Lo que sí está claro es que el aumento en la entrada de calcio, y por tanto en el reciclaje del calcio, es el mensajero decisivo durante la fase sostenida de la respuesta.

Se piensa que la PKC citosólica se encuentra en una forma relativamente inactiva. Sin embargo, cuando la quinasa se asocia con la membrana plasmática entra en contacto con fosfolípidos (el componente principal de la membrana) que incrementan la velocidad máxima de actividad de la enzima de 25 a 30 veces y su sensibilidad al ion calcio del orden de 100 veces o más. Esta forma de la PKC asociada a la membrana plasmática y sensible al calcio es la que actúa como transductor durante la segunda fase de la respuesta celular sostenida. Es el punto de mira del cambio localizado de concentración de calcio provocado por el aumento en el ciclo de recambio del calcio. El aumento en la concentración de calcio en la submembrana acelera la velocidad a la que la PKC fosforila otras proteínas.

La característica clave del modelo que emerge de nuestros estudios sobre respuesta sostenida en células adrenales es la operación de dos sistemas temporalmente distintos: el sistema de la calmodulina, activo durante la fase inicial de la respuesta, en el que el aumento transitorio en la concentración citosólica de calcio, inducido por el IP_3, actúa sobre las quinasas dependientes de calmodulina, que modifican la fosforilación de un subgrupo de proteínas celulares; y el sistema de la PKC, que a partir del aumento en la concentración de calcio en la submembrana actúa sobre la membrana plasmática y la PKC asociada para alterar la fosforilación de un diferente subgrupo de proteínas celulares que median la respuesta secundaria, mantenida, de la célula.

Este modelo, de doble sistema del calcio como segundo mensajero, parece poder explicar no sólo la secreción de aldosterona por las células adrenales en respuesta a la angiotensina II, sino también la secreción de insulina por las células beta y la contracción del músculo liso. En estos sistemas, sin embargo, la función del calcio como mensajero depende estrictamente de la actividad de otro sistema mensajero: el del AMPc.

Complejidad adicional

Las interrelacciones entre el calcio y el AMPc en la regulación de la secreción de insulina son demasiado com-

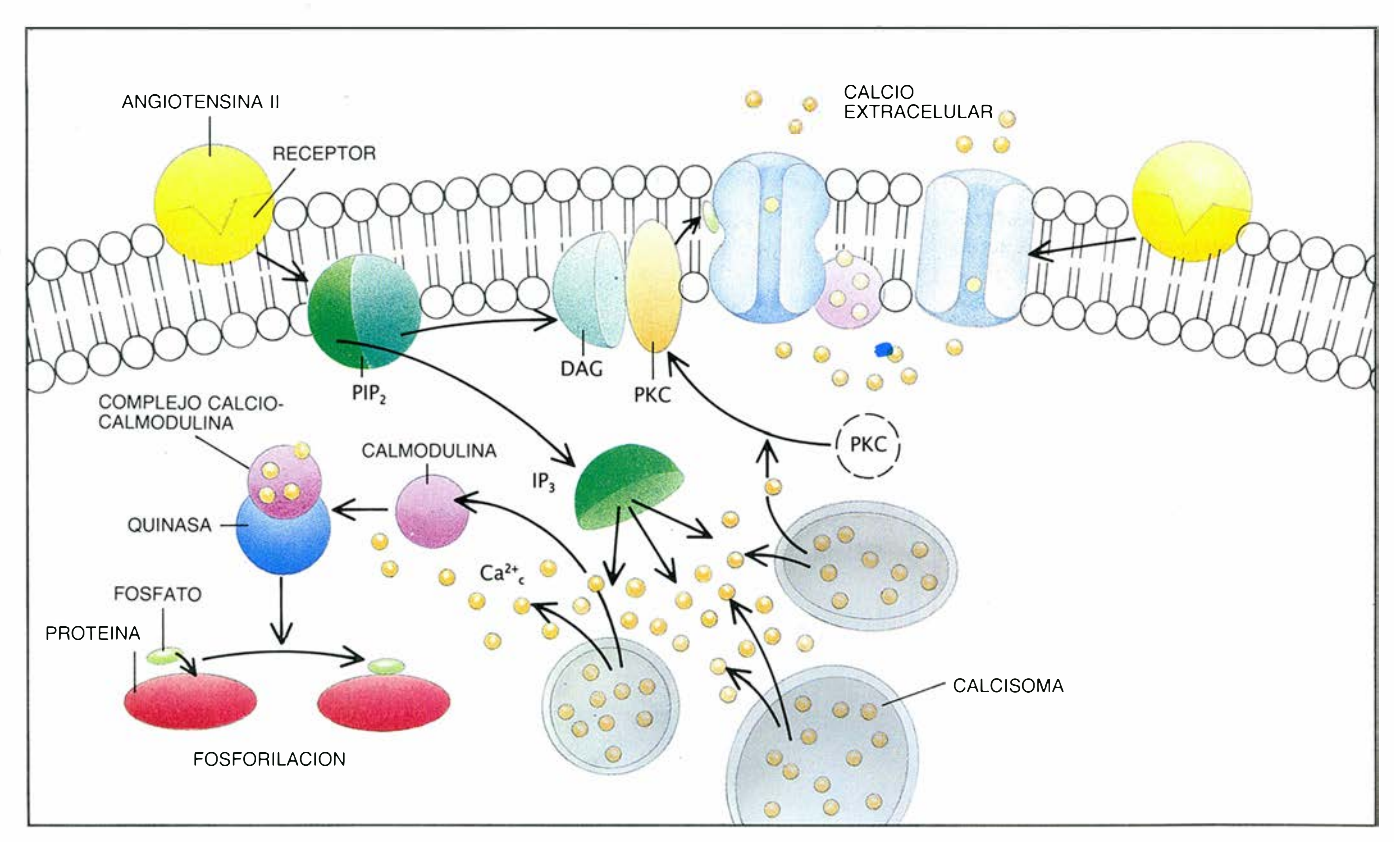
plejas para detallarlas una a una en este artículo. Limitaré mi exposición a la acción de la acetilcolina, un neurotransmisor que se une a receptores específicos de las células beta y desencadena en éstas los mismos fenómenos de señalización que la angiotensina II en las células adrenales. En la células beta, sin embargo, la situación es más compleja que en las adrenales, porque lo mismo el contenido celular de AMPc que la concentración extracelular de glucosa determinan el grado de efectividad de las señales generadas por la acetilcolina.

El contenido intracelular de AMPc puede incrementarse por la unión de ciertas hormonas a receptores específicos de las células beta. Una de estas hormonas, el denominado péptido gástrico inhibidor (PGI), es liberada por las células de la mucosa intestinal durante la ingestión y digestión de la comida. Cuando mis colegas Walter S. y Kathleen C. Zawalich y yo estudiamos el efecto conjugado de la acetilcolina y del PGI sobre la secreción de insulina de islotes aislados en el laboratorio, encontramos que, tal como esperábamos, la acetilcolina estimulaba la hidrólisis del PIP_2 y que el PIG activaba la síntesis de AMPc, La observación más destacable atañía al efecto de tal estimulación sobre la secreción de insulina: dependía de la concentración extracelular de glucosa. Así, cuando la concentración de glucosa era similar a su concentración en sangre antes de la comida, la presencia conjunta de acetilcolina y PGI sólo estimulaba la secreción de insulina de forma breve y en pequeña cantidad. Si, por el contrario, los islotes se exponían a una concentración de glucosa de aproximadamente un 50 por ciento superior, que es similar a la que encontramos en la sangre 30 a 60 minutos después de la comida, la misma combinación de acetilcolina y PGI causaban un significativo y sostenido aumento en la secreción de insulina.

A partir de los resultados de estos estudios y de otros desarrollados en varios laboratorios, llegamos a la conclusión de que la concentración de glucosa modifica los efectos de la acetilcolina y del PGI sobre el flujo de entrada del calcio. En el caso de una baja concentración de glucosa, la acetilcolina y el PGI apenas tienen efecto sobre la entrada de calcio, pero a altas concentraciones de glucosa estimulan la entrada de calcio vía un tipo específico de canales de la membrana que son dependientes del potencial eléctrico de la membrana. En las células beta, al igual que en las células adrenales, un aumento sostenido en el flujo de entrada de calcio (y por tanto un aumento en el reciclaje de calcio) es esencial para la respuesta celular sostenida.

La glucosa actúa como un modificante condicional de la capacidad de respuesta de las células beta mediante el control del potencial eléctrico de la membrana de dichas células. Cuando la concentración plasmática de glucosa es baja, el potencial eléctrico de la membrana es alto, y los canales de calcio de la membrana, dependientes de la diferencia de potencial, permanecen cerrados aun cuando la acetilcolina inicia la despolarización —una disminución en el potencial eléctrico de la membrana. Sin embargo, cuando la concentración plasmática de glucosa es alta la membrana se despolariza parcialmente: está en equilibrio, de forma que la despolarización adicional causada por la acetilcolina provoca la apertura de los canales, lo que permite la entrada del calcio en las células.

Además, el aumento en la concentración de AMPc que resulta de la estimulación por PGI determina que ciertos canales de calcio que estaban latentes se sensibilicen al voltaje, de tal manera que aumenta el número de canales que responden cuando ocurre un cam-



3. ACTIVACION de las células glomerulares suprarrenales por la angiotensina II. Nos ilustra la intervención del calcio como mensajero a través de dos vias diferentes durante dos fases temporalmente distintas de la respuesta celular prolongada. En la fase inicial (*izquierda*), la unión de la señal extracelular con su receptor provoca la degradación del componente de membrana PIP_2 para producir IP_3 y DAG. El IP_3 desencadena la liberación de iones calcio desde los calcisomas, unos compartimientos intracelulares, y provoca así un aumento transitorio de la concentración citosólica de calcio (Ca^{2+}_c).

bio apropiado en el potencial de membrana. Por tanto, cuando la acetilcolina y el PGI actúan conjuntamente a una concentración apropiada de glucosa, la velocidad de entrada de calcio –y en consecuencia el ciclo de recambio del calcio– se ven aumentados por dos mecanismos distintos.

Desde un punto de vista fisiológico, este tipo de control de la velocidad de entrada de calcio a la célula constituye un mecanismo de seguridad que evita una inapropiada secreción de insulina cuando la concentración de glucosa es baja –por ejemplo, antes de las comidas. Un sistema de seguridad semejante opera en las células glomerulares de las glándulas adrenales. El principal efecto de la secreción de aldosterona es el de disminuir la concentracióm plasmática de potasio. Un aumento en la concentración extracelular del ion potasio despolariza parcialmente la membrana plasmática de las células adrenales; el sistema está, por tanto, equilibrado de tal manera que un determinado tipo de canales dependientes de voltaje se abren en presencia de angiotensina II. Cuando la concentración de potasio en sangre cae hasta un valor bajo, la membrana plasmática se hiperpolariza, los canales están cerrados y la angiotensina II no puede abrirlos. Por consiguiente, la angiotensina II no puede desencadenar un aumento sostenido en la entrada de calcio o en la secreción de aldosterona cuando la concentración plasmática de potasio es baja. Este mecanismo de seguridad evita la secreción de aldosterona en aquellas situaciones en las que un aumento en la concentración plasmática de la hormona podría tener consecuencias letales.

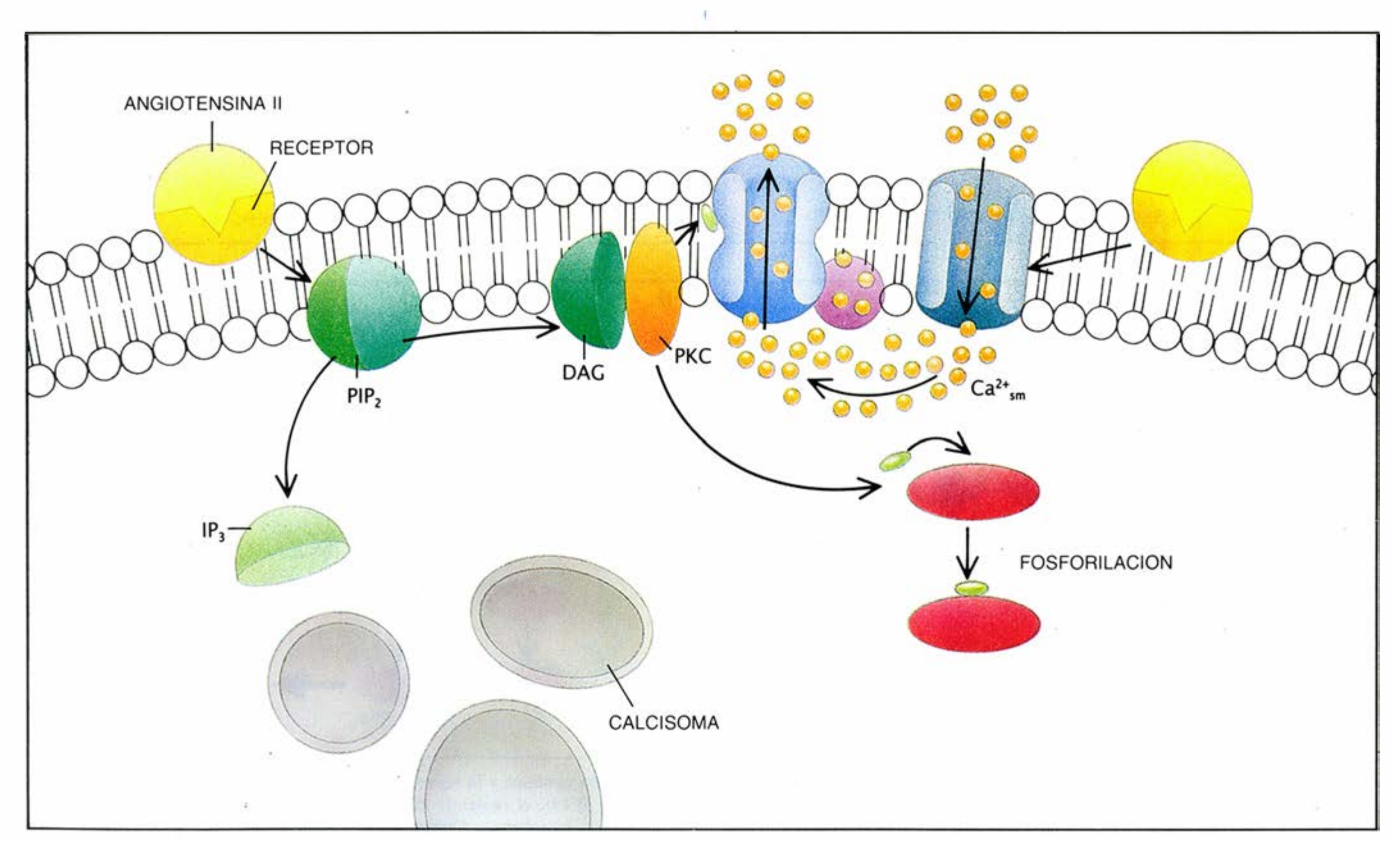
Modificación de la capacidad de respuesta

Con independencia de que la señal del calcio actúe por sí sola o junto con el AMPc, los dos fenómenos de importancia crítica en el mantenimiento de una respuesta celular sostenida son la asociación de la PKC con la membrana plasmática y el aumento en la velocidad de recambio del calcio a través de la membrana. En el caso de la activación de las células adrenales por la angiotensina II, ambos fenómenos ocurren simultáneamente. En determinadas circunstancias, sin embargo, ambos fenómenos están temporalmente disociados.

Por ejemplo, en las células adrenales la asociación de la PKC a la membrana y el aumento en el reciclaje del calcio pueden desacoplarse para generar una especie de "memoria" celular. Si se perfunden células adrenales aisladas en el laboratorio con angiotensina II durante tres períodos de entre 15 y 20 minutos, separados por intervalos de aproximadamente igual duración, la secreción de aldosterona que se produce durante las exposiciones sucesivas es superior a la observada en el periodo precedente. Por tanto, las células adrenales "recuerdan" su exposición previa a la angiotensina II.

Esta memoria es transitoria; cuanto más largo es el intervalo entre dos exposiciones a la angiotensina II, menos espectacular es el aumento en la secreción de aldosterona. Este fenómeno parece explicarse por el hecho siguiente: la PKC asociada a la membrana no se disocia inmediatamente una vez terminada la señal de angiotensina. La exposición adicional a angiotensina II no sólo reactiva la PKC que permanece todavía asociada a la membrana plasmática, sino que también, adicionalmente, se asocian a la membrana nuevas moléculas de PKC. De esta forma, tras una reexposición a angiotensina II, la respuesta es más intensa.

Otro ejemplo del mismo tipo de asociación persistente de la PKC a la membrana plasmática se observa en la ac-



Los iones calcio se unen a calmodulina y el complejo calcio-calmodulina activa las quinasas proteicas (enzimas que transfieren grupos fosfatos a las proteínas). Las proteínas fosforiladas inician la respuesta celular, que en este caso es la secreción de aldosterona. Los iones calcio liberados de los calcisomas y el aumento en DAG hacen que la enzima PKC se asocie con la membrana. En la fase sostenida (*derecha*), la angiotensina II aumenta el flujo de calcio a través de la membrana; la mayor concentración de calcio en la submembrana (Ca^{2+}_{sm}) activa la PKC y promueve la fosforilación de proteínas.

ción de la acetilcolina sobre las células beta. Recordemos que, cuando los niveles plasmáticos de glucosa eran bajos, la acetilcolina estimulaba la hidrólisis del PIP_2 sin aumentar significativamente la secreción de insulina al no acelerarse la velocidad de recambio del calcio. ¿Cuál puede ser la función de la señal de acetilcolina en estas situaciones? Mis colegas los Zawalich y yo creemos tener la contestación.

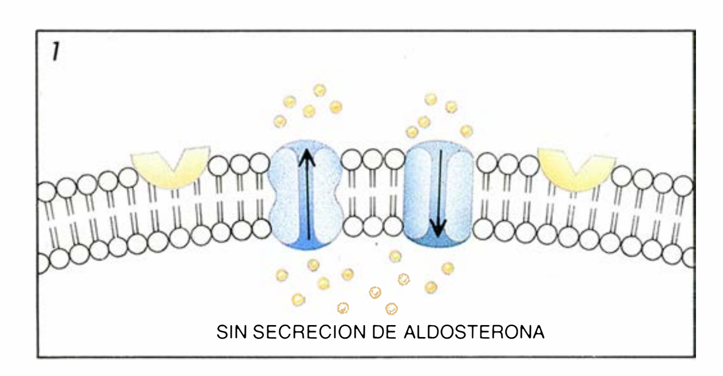
Proponemos que, por medio de un aumento transitorio en la concentración citosólica de calcio, inducido por el IP_3, y la generación del DAG, la acetilcolina provoca la translocación de la PKC a la membrana plasmática de las células beta. Dado que el ciclo de recambio del calcio no está aumentado, la PKC se halla asociada a la membrana pero no está activada; se encuentra disponible, sin embargo, para ser activada cuando se dé el pequeño aumento postpandrial en la concentración de glucosa y el consecuente aumento en el flujo de entrada de calcio. La acetilcolina prepara, por tanto, a las células beta para responder al aumento postpandrial en la concentración plasmática de glucosa con una liberación de insulina mayor que la que podría de otra manera producir la hormona.

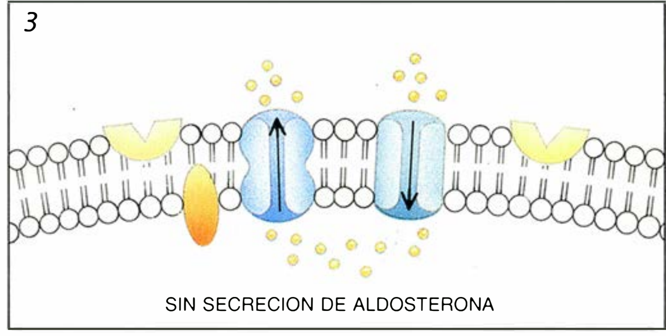
Cascada de quinasas

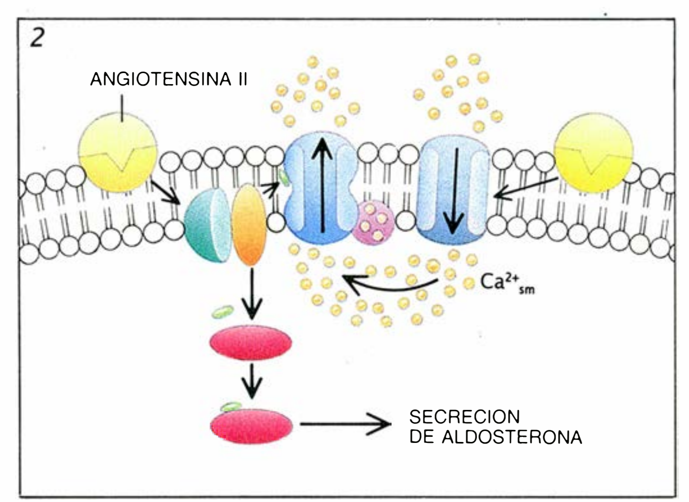
Mis colegas y yo ampliamos nuestra investigación sobre la respuesta celular de tipo sostenido estudiando la contracción del músculo liso, uno de los tejidos más comunes en el cuerpo humano. El músculo liso −que a diferencia del músculo esquelético no está bajo control voluntario− es uno de los componentes clave de las paredes de la tráquea y bronquios y de los vasos sanguíneos, uréter, estómago, intestino y útero. Susanna S. C. Park, Yoh Takuwa, Grant G. Kelley, Hermann Haller y yo nos centramos en el estudio del músculo liso de la tráquea y arterias carótidas de la vaca. La acetilcolina produce un incremento, rápido y sostenido, de la contracción del músculo traqueal; la histamina, otra señal extracelular, provoca el mismo tipo de respuesta en el músculo de la arteria carótida.

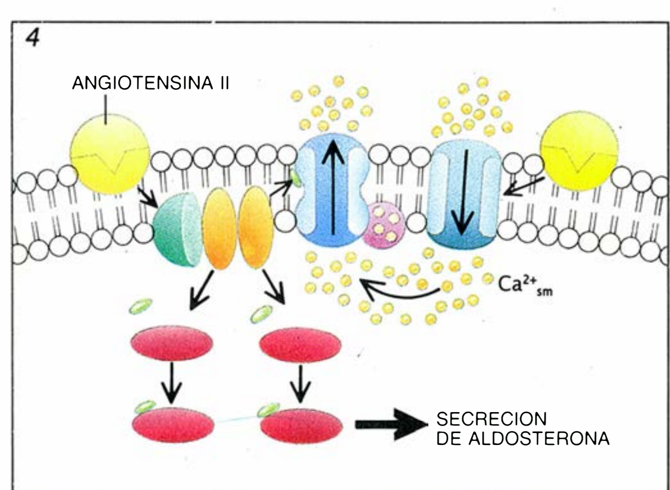
La acción de ambas señales parece poder explicarse por un modelo casi idéntico al desarrollado para la acción de la angiotensina II en las células adrenales. El responsable del inicio de la contracción es un aumento transitorio en la concentración citosólica de calcio, que estimula una enzima dependiente de calmodulina, la quinasa de miosina de cadena ligera. Le sigue un aumento transitorio en el grado de fosforilación de la proteína miosina de cadena ligera, que incoa una rápida respuesta contráctil, aunque transitoria. Al mismo tiempo, igual que ocurre en las células adrenales, el aumento en el calcio citosólico (junto con el DAG producido por la degradación del PIP_2) también induce la asociación de la PKC a la membrana. Durante la fase sostenida de la contracción muscular, un aumento en la concentración del ion calcio en el dominio de submembrana celular activa la PKC asociada a la membrana, de tal manera que un grupo de proteínas se fosforilan y se mantienen fosforiladas, prolongando la contracción.

Dos de las proteínas de alto peso molecular que se fosforilan durante la con-









4. OCURRE EL EFECTO DE "MEMORIA" cuando las células adrenales se exponen, en el tubo de ensayo, a dosis sucesivas de angiotensina II. En el estado basal (*1*) el reciclaje de calcio se produce con lentitud, la concentración de calcio en la submembrana es baja y la PKC no está asociada con la membrana plasmática. Una primera exposición a angiotensina II (*2*) determina que la PKC se mueva hacia la membrana y aumente el reciclaje de calcio; estos cambios aumentan a su vez la actividad de la proteína quinasa C, la fosforilación proteica y la secreción de aldosterona. Cuando se elimina la angiotensina II (*3*), el reciclaje del calcio disminuye, pero la PKC permanece asociada a la membrana. Con subsecuentes exposiciones a angiotensina II (*4*), más unidades de proteína quinasa C se mueven hacia la membrana, fomentando la fosforilación proteica y la secreción de aldosterona. De ese modo, la asociación persistente de PKC a la membrana plasmática puede considerarse un tipo de memoria que recuerda la estimulación previa por angiotensina II.

tracción del músculo liso, la desmina y la caldesmon, han aportado luz para la resolución de un interrogante presentado por nuestro nuevo modelo: ¿de qué manera la PKC asociada a la membrana plasmática puede actuar sobre proteínas que se encuentran a cierta distancia en el medio celular? La desmina y la caldesmon son proteínas que se localizan en dominios celulares alejados del lugar de acción de la PKC. Dada su localización intracelular y sus asociaciones con complejas y altamente organizadas estructuras macromoleculares, es improbable que cualquiera de estas proteínas se mueva alternativamente entre su dominio particular y la región de la membrana donde opera la PKC.

Nuestros propios estudios y los realizados por David R. Hathaway y sus colegas, del Hospital Clínico de la Universidad de Indiana, muestran que ambas proteínas se fosforilan durante la fase sostenida de la contracción del músculo liso de la tráquea o la arteria carótida. En el tubo de ensayo, la PKC fosforilará la desmina y la caldesmon directamente. Sin embargo, un examen más detallado de lo que ocurre en el tubo de ensayo revela que, en respuesta al tratamiento con acetilcolina o histamina, el punto de fosforilación difiere del lugar que se fosforila durante la contracción del músculo intacto.

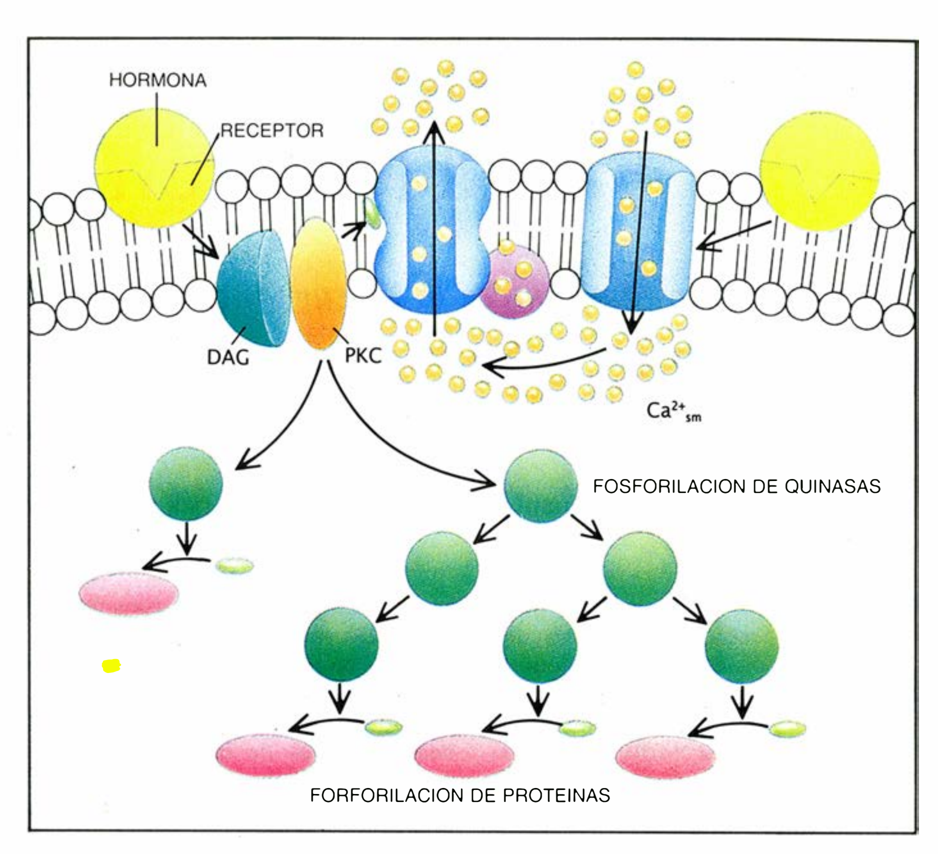
De estos resultados sacamos dos conclusiones. Primera, muchas proteínas intracelulares pueden constituir un substrato potencial de una determinada quinasa proteica, pero en la célula no sirven como tales debido a que residen en un dominio subcelular distinto del dominio donde la quinasa funciona normalmente. Segunda consecuencia: la fosforilación de desmina y caldesmon en el músculo estimulado débese, probablemente, a una quinasa proteica distinta de la PKC.

Dado que la PKC sí parece desencadenar la fosforilación, postulamos la presencia de "cascadas" de quinasas proteicas en las que uno o varios substratos de la PKC son quinasas proteicas. Una quinasa fosforila a otra hasta que una de las quinasas de la cascada termina por fosforilar la desmina o la caldesmon. Se ha observado un tipo de cascada semejante en la acción de la insulina sobre sus células diana.

Un nuevo mensajero de calcio

Nuestros estudios sobre la función del calcio como mensajero en la respuesta celular sostenida revelan que, a diferencia de lo que el modelo clásico del calcio como mensajero proponía, el aumento y caída de la concentración citosólica de iones de calcio parece operar como mensajero intracelular sólo durante respuestas celulares breves o en el curso de la fase inicial de las respuestas sostenidas. Durante la fase sostenida, la señal del calcio se genera en una región restringida de la membrana celular mediante un aumento del recambio del calcio a través de la membrana. Esta señal de calcio de la submembrana actúa sobre transductores asociados a la membrana plasmática, sensibles al calcio, de forma que generen a su vez otras señales. Por lo común, son mensajeros generados por los transductores —más que el calcio o los mismos transductores— los que llevan la información desde la superficie celular hasta el interior de la célula.

Todavía queda mucho por aprender en lo referente a las cascadas de quinasas y al control separado del reciclaje del calcio y de la asociación de la PKC a la membrana plasmática. Sin embargo, gracias a una comprensión cada vez mayor de este nuevo tipo de mensajero dependiente de calcio ya se ha avanzado en la investigación sobre el aprendizaje asociado [véase "Almacenamiento de memoria y sistemas neurales", por Daniel L. Alkon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1989]. Por su relación con la secreción de insulina y la constricción de los vasos sanguíneos, la investigación sobre el mensajero aportará nuevos conocimientos sobre la secuencia de fenómenos que conduce a la diabetes y al desarrollo de una alta presión sanguínea.



5. UNA "CASCADA" DE QUINASAS puede explicar la capacidad que encierra la activación de la PKC de alterar la fosforilación de proteínas localizadas en puntos alejados de la célula, aun cuando esa enzima en cuestión permanezca en la membrana plasmática. La cascada podría empezar con la activación de la proteína quinasa C; esta PKC podría fosforilar y activar así otras quinasas (*verde*), lo que podría a su vez activar otras enzimas para modificar la función de numerosas y diferentes proteínas efectoras (*rojo*).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CALCIUM AND cAMP AS SYNARCHIC MESSENGERS. Howard Rasmussen. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

INTRACELLULAR CALCIUM: ITS UNIVERSAL ROLE AS REGULATOR. Anthony K. Campbell. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

THE CALCIUM MESSENGER SYSTEM. Howard Rasmussen en *New England Journal of Medicine*, vol. 314, n.° 17, págs. 1094-1101; 24 de abril de 1986 y vol 314, n.° 18, págs. 1164-1170; 1 de mayo de 1986.

A SPATIAL-TEMPORAL MODEL OF CELL ACTIVATION. Daniel L. Alkon y Howard Rasmussen en *Science*, vol. 239, n.° 4843, págs. 998-1005; 26 de febrero de 1988.

PHOSPHORYLATION OF CALDESMON IN ARTERIAL SMOOTH MUSCLE. Leonard P. Adams, Joe R. Haeberle y David R. Hathaway en *Journal of Biological Chemistry*, vol. 264, n.° 13, págs. 7698-7703; 5 de mayo de 1989.

El monóxido de carbono y la Tierra en llamas

Las mediciones de monóxido de carbono desde el espacio han hallado grandes cantidades del gas en lugares inesperados. La combustión de la pluviselva y la sabana rivaliza, en la liberación de CO, con el transporte y la industria

Reginald E. Newell, Henry G. Reichle, Jr., y Wolfgang Seiler

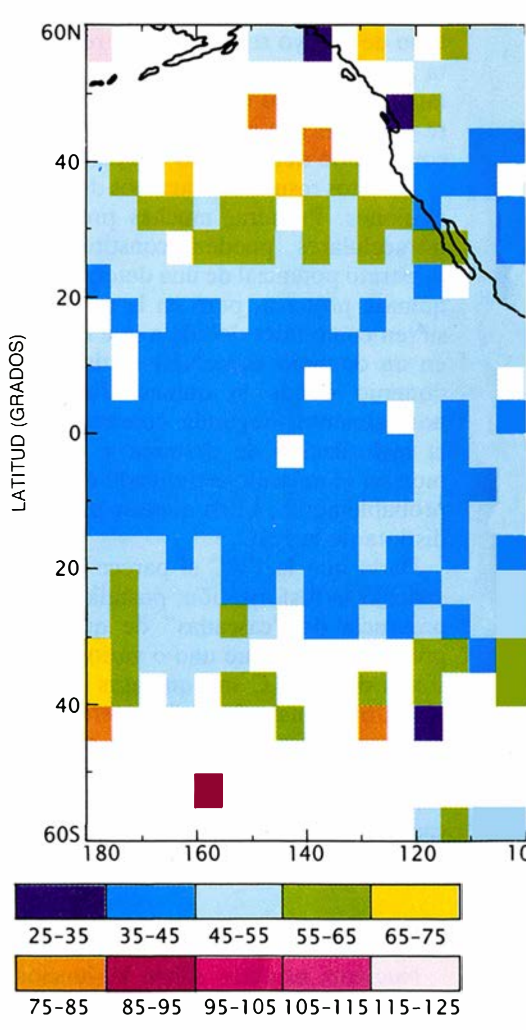
Veinte años atrás, un mapa de la atmósfera que ilustrase la distribución esperada de monóxido de carbono y sus movimientos, habría colocado la casi totalidad del mismo en el hemisferio Norte. Los expertos coincidían en señalar que casi todo el monóxido de carbono provenía de la combustión de carburantes fósiles y que el septentrión acaparaba la mayor parte de la industria y transporte del mundo. El mapa habría mostrado que buena fracción del gas yacía perezosamente cerca del suelo, donde se producía, en los dos kilómetros más bajos de la atmósfera, o capa fronteriza. La convección podría transportar parte del mismo a mayores alturas y, desde allí, arrastrarlo hacia el hemisferio Sur. Si eso no ocurría, el monóxido de carbono permanecería en el Norte.

Ese mapa habría falseado la realidad. Las chimeneas industriales y los tubos de escape de los automóviles no son, ni han sido nunca, las únicas fuentes importantes de monóxido de carbono. Más aún: tal vez ni siquiera sean las fuentes principales de ese gas incoloro e inodoro. Un instrumento en cuyo desarrollo los autores prestamos nuestra colaboración, y que repitió vuelo a bordo de un transbordador espacial, ha proporcionado "instantáneas" globales de la distribución de monóxido de carbono sobre una amplia faja de la Tierra. Sus mediciones y los datos recogidos por aviones y estaciones terrestres durante los últimos 10 años han mostrado con claridad que la quema de bosques tropicales y sabanas genera al menos tanto monóxido de carbono como la combustión de carburantes fósiles.

El descubrimiento es alarmante, aunque no por el carácter tóxico del gas. Este se combina fuertemente con la hemoglobina de la sangre e impide que el oxígeno llegue a los tejidos. Las concentraciones de monóxido de carbono típicas de los túneles de carreteras y de las calles muy concurridas, de unas 20.000 moléculas por cada mil millones de moléculas de aire, provoca mareos. Las concentraciones de monóxido de carbono sobre la pluviselva tropical suelen ser cientos de veces menores. Pero, por otro lado, el gas comporta otras ominosas implicaciones para el medio ambiente. En primer lugar, los altos niveles de monóxido de carbono procedentes de la quema de vegetación confirman otras indicaciones, de acuerdo con las cuales la pluviselva tropical se está diezmando a pasos agigantados. La destrucción de sus bosques comportaría, probablemente, cambios desastrosos en los climas de esas regiones y, quizás, en los del resto del mundo. En segundo lugar, el aumento notable de monóxido de carbono atmosférico podría favorecer la acumulación de gases contaminantes como el ozono, que es altamente tóxico para las plantas, y el metano, que contribuye al efecto de invernadero y puede provocar con ello una subida de la temperatura global.

Durante muchos años parecía improbable que hubiera altas concentraciones de monóxido de carbono en el hemisferio Sur y en los trópicos; creíase que el origen del gas residía, de manera exclusiva, en la industria y la

REGINALD E. NEWELL, HENRY G. REICHLE, Jr., y WOLFGANG SEILER han colaborado en el estudio del monóxido de carbono atmosférico durante el proyecto titulado "Medición de la contaminación atmosférica desde el espacio" (MAPS). Newell es catedrático de meteorología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Le interesa sobre todo la física de las fluctuaciones climáticas y la circulación atmosférica en gran escala. Reichle, adscrito al Centro de Investigación Langley de la NASA, ha trabajado activamente en la telemedición de propiedades atmosféricas desde 1965. Seiler es director del Instituto Fraunhofer de Investigación del Medio Ambiente Atmosférico en Garmisch-Partenkirchen, Alemania occidental.



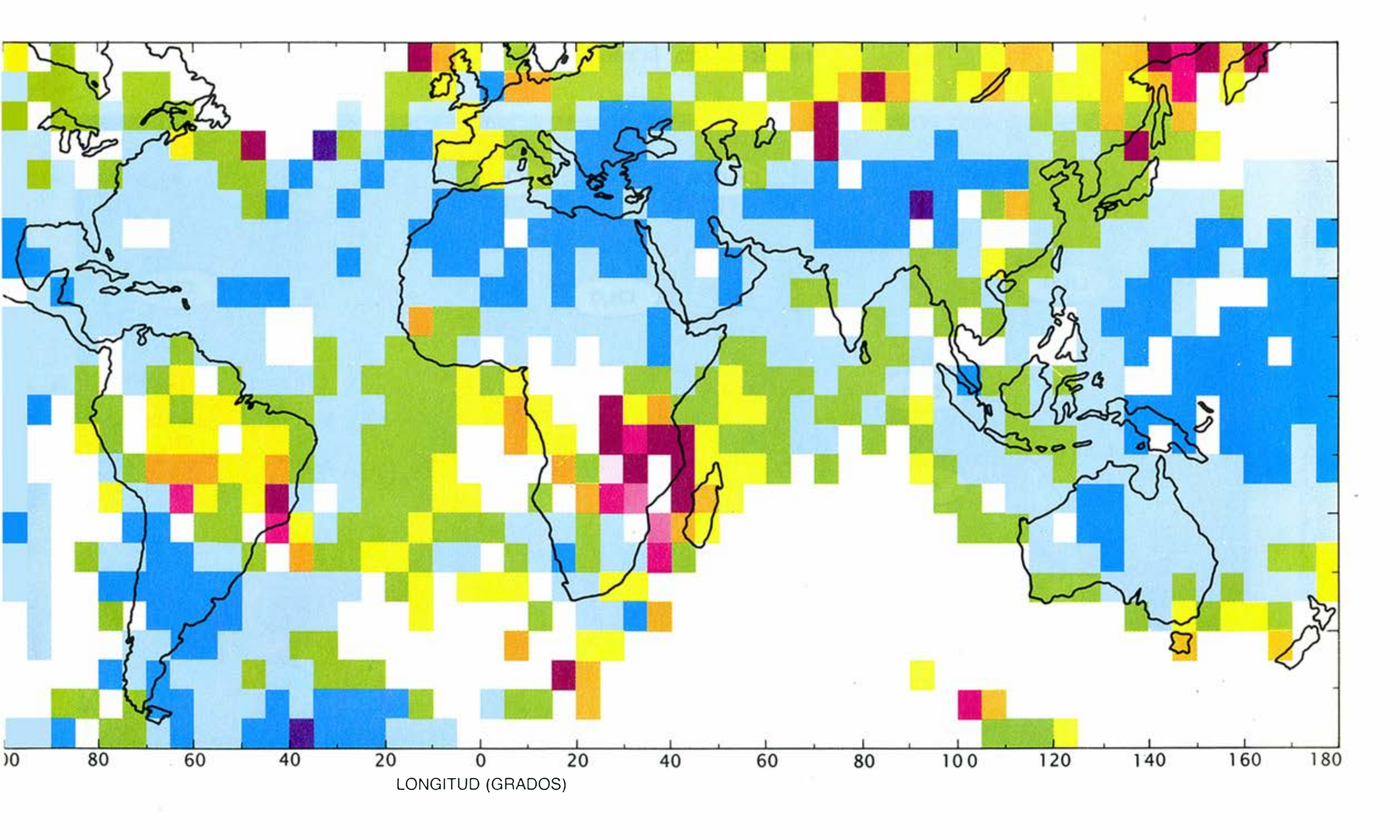
automoción (principalmente del hemisferio Norte). Hasta hace relativamente poco, los estudios de monóxido de carbono atmosférico realizados desde el suelo o al nivel del mar respaldaban por lo común esa idea. Así, en 1969, las muestras de aire recogidas desde un barco por uno de los autores (Seiler) y Christian Junge, del Instituto Max Planck de Química en Mainz, navegando por el océano Atlántico tropical, contenían mayores niveles de monóxido de carbono al norte del Ecuador. Durante el mismo período, las mediciones tomadas desde aviones que cubrían la ruta Frankfurt-Johannesburgo, a una altura de unos 10 kilómetros, mostraron concentraciones de monóxido de carbono casi idénticas en los hemisferios Norte y Sur. Los resultados se atribuyeron a una mezcla muy eficaz del aire del hemisferio boreal con el del austral a grandes alturas.

Pese a ello, el descubrimiento de niveles apreciables de monóxido de carbono en el hemisferio Sur espoleó las investigaciones sobre otras fuentes, además de la combustión de carburantes fósiles. Se prestó atención a la química atmosférica relacionada con el hidroxilo (OH), un radical altamente reactivo. El hidroxilo es el producto de una reacción entre las moléculas de agua atmosféricas y los átomos de oxígeno excitados que quedan libres cuando la luz solar descompone las moléculas del ozono a baja altura. Su alta reactividad hace del hidroxilo el gas limpiador más importante de la atmósfera, oxidando vorazmente el metano y otras moléculas.

James C. McConnell, Michael B. McElroy y Stephen C. Wofsy, de la Universidad de Harvard, sugirieron en 1971 que, cuando el hidroxilo oxida al metano en la atmósfera, desencadena una serie de reacciones que producen abundante monóxido de carbono. El metano está distribuido en concentración casi uniforme por toda la atmósfera; abunda, pues, en el hemisferio Sur. De acuerdo con los cálculos del grupo de Harvard, el metano constituía, en potencia, una fuente de monóxido de carbono mayor que la combustión de carburantes fósiles.

El monóxido de carbono inyectado en la atmósfera no permanece en ella para siempre. Tras un período que varía entre unos 10 días y varios meses, desaparece. Se sabe que parte del gas se deposita sobre la Tierra y es absorbido por el suelo. Cuando se realizaron los estudios de Harvard, Hiram Levy II, del Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Cambridge, Massachusetts, había demostrado ya que el hidroxilo podía también eliminar monóxido de carbono del aire convirtiéndolo en dióxido de carbono.

Pese a estos avances teóricos, el problema de la formación y eliminación del monóxido de carbono no podía resolverse del todo hasta conocer la distribución del gas. Las regiones de concentración insólitamente alta podrían ofrecer indicios acerca de las fuentes de monóxido de carbono; las zonas de concentración baja podrían revelar dónde abandonaba la atmósfera. Mas, ¿cómo crear mapas extensos y detallados de la distribución del monóxido de carbono? No procedía re-



1. SEGUN DATOS recogidos por el grupo del MAPS ("Medición de la contaminación atmosférica desde el espacio"), el aire rico en CO procedente de la pluviselva y la sabana se eleva sobre las regiones tropicales. Ha quedado claro que el monóxido de carbono no es exclusivamente un producto secundario del transporte y la industria. Este mapa está basado en mediciones realizadas desde el *Challenger* con un instrumento sensible al infrarrojo en octubre de 1984. Los valores del CO muestran la proporción de mezcla con el aire a altitudes de entre tres y 18 km; los penachos son arrastrados desde sus puntos de origen por los vientos. Cada cuadrado mide cinco grados por lado; el código de colores representa el promedio de múltiples mediciones en la región.

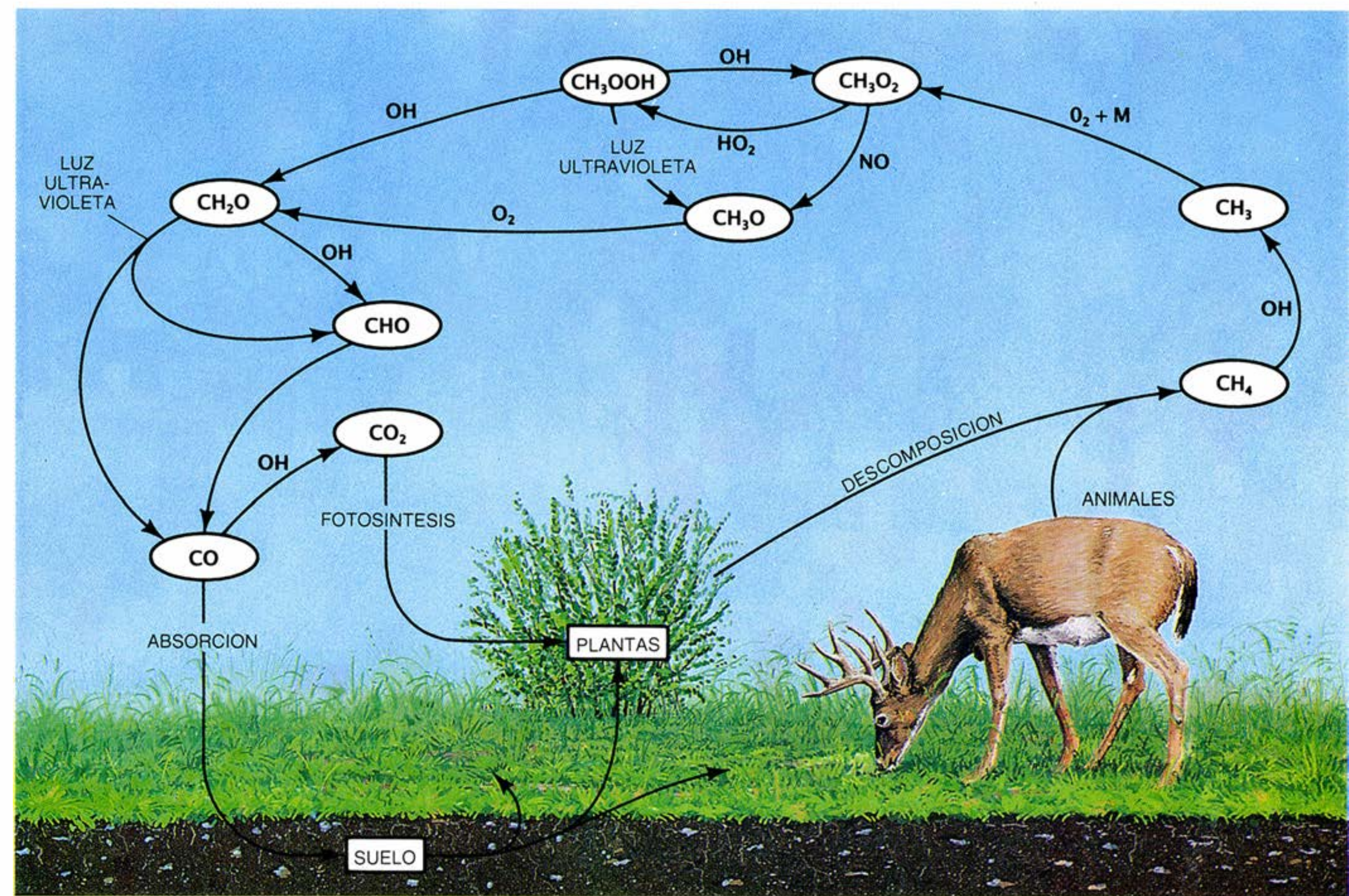
currir a las mediciones realizadas desde el suelo o desde aviones porque se requeriría un número ingente de ellas. Harían falta meses o años para que toda una flota de aviones recogiera datos suficientes que permitiera levantar un mapa detallado, que, por otra parte, no recogería las fluctuaciones de la concentración en breves lapsos de tiempo.

Mientras se llevaban a cabo los estudios de Harvard y otros trabajos, distintos grupos estaban ponderando las posibilidades de aplicación de los satélites en órbita terrestre para realizar exploraciones globales de monóxido de carbono. Un instrumento en órbita podría compilar suficientes mediciones para levantar un mapa en pocos días, recogidas en condiciones casi simultáneas en diferentes longitudes y latitudes. Las investigaciones teóricas de Claus Ludwig y sus colaboradores en Convair Incorporated mostraron la posibilidad de medir el monóxido de carbono desde un satélite mediante radiometría de filtro de gas. Esta técnica había sido ya aplicada por el grupo de John T. Haughton, de la Universidad de Oxford, para estudiar la temperatura atmosférica mediante el satélite *Nimbus IV*.

Se comprobó el funcionamiento a bordo de aviones de varias modalidades de la técnica del filtro de gas en el Centro de Investigación Langley, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Se adoptó una de ellas, propuesta por Anthony Barringer, de Barringer Research, Inc., de Toronto: sería el candidato a partir del cual desarrollar el instrumento que embarcaría en el satélite. Uno de los autores (Reichel) invitó entonces a los demás (Newell y Seiler) a formar parte del equipo científico que dirigiría el desarrollo de un experimento a realizar a bordo del transbordador espacial. El experimento, que se denominó "Medición de contaminación atmosférica desde el espacio" (MAPS), se propuso durante 1976 para uno de los vuelos orbitales de prueba del transbordador.

El radiómetro MAPS de filtro de gas se basa en el principio según el cual el monóxido de carbono absorbe la radiación infrarroja a frecuencias discretas. Esta absorción selectiva sirve de "huella dactilar" para detectar y medir concentraciones del gas en la atmósfera. El monóxido de carbono absorbe, de manera característica, la energía infrarroja a longitudes de onda próximas a 4,67 micrometros (millonésimas de metro), aunque la forma precisa de la absorción depende de la presión y de la temperatura del gas.

La lente objetivo del instrumento MAPS apunta hacia la Tierra y capta la radiación del sistema Tierra-atmósfera. Después, esta radiación se "fragmenta" periódicamente mediante una rueda giratoria que también introduce destellos de radiación infrarroja procedentes de una placa de aluminio ennegrecido a temperatura controlada. Esta placa, llamada fuente de radiación de cuerpo negro, radia un espectro conocido que no presenta pérdidas por absorción a ninguna longitud de onda. Este espectro suavizado sirve de referencia para medir las cantidades de radiación absorbidas por la atmósfera. El haz combinado atraviesa un filtro que elimina todas las longitudes de onda, excepto las próximas a 4,67 micrometros. Divisores de haz separan esta radiación seleccionada y la dirigen a tres fotodetectores. Uno de ellos está situado detrás de una célula de gas, transparente y vacía; mide alternativamente la intensidad absoluta de la señal de la



2. FORMACION NATURAL DEL MONOXIDO DE CARBONO en la atmósfera mediante una cadena de reacciones que comienza con la oxidación del metano (CH_4) por el radical hidroxilo (OH). El hidroxilo es esencial en varios pasos del ciclo, tanto en la formación del monóxido de carbono (CO) como en su transformación en dióxido de carbono (CO_2); el monóxido de carbono compite con otros gases por el hidroxilo. A medida que los niveles de monóxido de carbono suben con la quema de bosques húmedos y otros procesos, ese gas gasta una mayor cuota de hidroxilo. (Thomas C. Moore.)

atmósfera y la del cuerpo negro. Los otros dos detectores se encuentran detrás de unas células llenas de monóxido de carbono a distintas presiones. El registrador del instrumento almacena tres mediciones: la salida electrónica del detector tras la célula de vacío con el correspondiente registro temporal y las dos diferencias entre esa salida y las de los detectores tras los filtros de gas.

Las dos señales de diferencia representan los grados de semejanza entre los cambiantes espectros de la atmósfera y las señales constantes de cada una de las cápsulas de monóxido de carbono puro. Cuando la región de la atmósfera que se mide se halla bastante libre de monóxido de carbono, las diferencias son grandes; pero, cuando la atmósfera se enriquece en monóxido de carbono, las diferencias se acortan. A partir de esas medidas y de las temperaturas y presiones conocidas en el interior de las cápsulas de gas, se infiere la proporción de dióxido de carbono que hay en la atmósfera. Ese valor se denomina proporción de mezcla.

Por variar con la presión el espectro de radiación del monóxido de carbono, cada detector responde más intensamente al monóxido de carbono a diferente altura. El detector situado tras el monóxido de carbono cuya presión es de 266 milímetros de mercurio presenta su máxima sensibilidad ante los gases en alturas comprendidas entre tres y ocho kilómetros, mientras que la "lectura" a través de monóxido de carbono a una presión de 76 milímetros de mercurio está ajustada para medir el gas a mayores alturas. El detector sin filtro responde de manera preferente a la radiación desde el suelo. Las diferentes curvas de respuesta de los detectores nos ayudan a estimar la altura del monóxido de carbono medido durante los experimentos MAPS.

Para llegar a las proporciones de mezcla de monóxido de carbono a partir de las medidas de los detectores, necesitamos también conocer otros factores que influyen en la radiación que atraviesa la atmósfera. Por consiguiente, tuvimos en cuenta las condiciones meteorológicas, el ángulo de elevación solar durante nuestras observaciones y las estimas de la reflectividad del terreno. La información del Centro de Oceanografía Numérica de la Armada de los EE.UU. fue inapreciable. Elaboramos modelos atmosféricos que nos ayudaron a introducir correcciones instadas por la presencia del vapor de agua, dióxido de carbono, ozono y óxido nitroso, todos los cuales absorben energía también cerca de 4,67 micrometros.

Las nubes en el campo de observación del instrumento pueden también perturbar las medidas; introdujimos las oportunas correcciones. Nuestra solución durante el primer vuelo del MAPS en transbordador fue alinear una cámara con el eje sensor del radiómetro, de modo que el sistema Tierra-atmósfera se podía fotografiar mientras se tomaban las medidas. Más tarde, nuestros colegas Warren D. Hypes, del Centro de Investigación Langley, y Barbara B. Gormsen, que estaba entonces en la Fundación de Investigación de la Universidad Old Dominion en Norfolk, Virginia, inspeccionaron minuciosamente esas fotografías en busca de la cobertura nubosa y eliminaron, del conjunto de datos del MAPS, todas las mediciones de monóxido de carbono que se habían tomado a través de nubes.

Había que comprobar la sensibilidad del instrumento MAPS para altas y para bajas proporciones de mezcla de monóxido de carbono. Para hacer la prueba con alta proporción de mezcla, montamos el radiómetro en un avión, que voló sobre el lago Michigan con la misión de explorar el monóxido de carbono producido por el tráfico de la hora punta matutina en Chicago. Se detectaron los penachos de monóxido de carbono de Chicago y de Milwaukee. El penacho de la primera ciudad presentaba niveles de monóxido de carbono que, promediados en altitud, daban 260 moléculas por mil millones de moléculas de aire, valor, aunque alto, no inesperado.

Durante lo que se suponía iba a ser la prueba con baja proporción de mezcla, el MAPS midió por primera vez niveles de monóxido de carbono en regiones remotas y ajenas a la industrialización. En el verano de 1979 se incluyó el MAPS en el MONEX, un proyecto internacional para estudiar los monzones de la India. A bordo de un avión Convair 990 de la NASA, el radiómetro MAPS tomó lecturas a lo largo de dilatados vuelos de crucero por el mar Arábigo a una altitud de unos 12 kilómetros. Estas lecturas fueron comprobadas mediante análisis de muestras de aire recogidas en vuelo por Estelle P. Condon, entonces en la Universidad Old Dominion.

Para nuestra sorpresa, estos vuelos detectaron concentraciones de monóxido de carbono en las capas fronterizas sobre Arabia Saudita y el valle del Ganges, en la India, que eran todavía mayores que las que se habían hallado sobre Chicago a la hora punta. Tanto las mediciones del MAPS como el análisis de las muestras arrojaban proporciones de mezcla en esas regiones por encima de las 300 moléculas de monóxido de carbono por mil millones de moléculas de aire. Sobre el mar Arábigo se encontraron concentraciones mucho más bajas, de unas 80 moléculas por mil millones de moléculas de aire, cerca del Ecuador, donde el aire del hemisferio Sur se estaba incorporando en la circulación monzónica.

A medida que progresaba el trabajo del MAPS, se fueron acumulando otras pruebas contra el viejo punto de vista que asociaba el monóxido de carbono casi exclusivamente con regiones desarrolladas. Durante la estación seca, en agosto y septiembre de 1980, uno de nosotros (Seiler) y expertos del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Boulder, Colorado, participaron en un estudio de monóxido de carbono y otros gases sobre Brasil. Las mediciones realizadas desde aviones mostraron concentraciones en la capa fronteriza de hasta 400 moléculas por mil millones de moléculas de aire sobre la pluviselva tropical virgen. Se encontraron incluso valores más altos, algunos de los cuales se salieron de la escala del instrumento de medida, cerca de una sabana brasileña que estaba ardiendo.

No tardaron en aparecer nuevas teorías para explicar de qué modo los bosques podían aportar monóxido de carbono a la atmósfera. Inspirado por los datos recogidos en Brasil, Paul J. Crutzen, del Instituto Max Planck [véase "Una atmósfera cambiante", por Thomas E. Graedel y Paul J. Crutzen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1989] sugirió que se podían formar grandes cantidades de monóxido de carbono sobre la pluviselva virgen por medio de la oxidación fotoquímica de hidrocarburos distintos del metano. Estos hidrocarburos provendrían de las resinas y aceites desprendidos principalmente por los árboles. Alain Marenco, del Centro de Física Atómica de Toulouse, y Jean Claude Delauny, del Laboratorio de Física Atmosférica de Abidjan, Costa de Marfil, acaban de llegar a conclusiones similares a partir de datos obtenidos sobre bosques tropicales de Africa.

En colaboración con Seiler, Crutzen propuso también que la combustión de biomasa (la vegetación que se tala y los excrementos de animales que sirven de combustible) constituye una de las fuentes principales de carbono atmosférico. Sólo una parte del mismo toma la forma de monóxido; otra fracción mucho mayor se convierte en dióxido y en partículas de carbono. La combus-

ción de biomasa aporta anualmente a la atmósfera, según los cálculos de Seiler y Crutzen, de dos a cuatro mil millones de toneladas métricas de carbono. Trabajos realizados por Helene Cachier y sus colaboradores en el Centro de baja radiactividad de Gif-sur-Yvette han mostrado también que los aerosoles carbonados de los bosques tropicales liberan a la atmósfera tantas partículas carbonadas pequeñas como todas las fuentes industriales. Muchos de esos aerosoles se producen durante la estación seca, cuando ocurren la mayoría de los incendios naturales y antropogénicos.

En medio de este cúmulo de sorpresas y nuevas teorías, el radiómetro MAPS se instaló a bordo de la lanzadera espacial en su segundo vuelo de prueba, en noviembre de 1981. Por culpa de los fallos en los sistemas de alimentación eléctrica y refrigeración del transbordador, sólo se recogieron once horas de datos aprovechables en el curso de dos días, lo que representa unas 10.000 observaciones de monóxido de carbono a alturas entre tres y doce kilómetros.

Las regiones observadas se encuentran en la banda tropical, entre las latitudes 37 grados Norte y 37 grados Sur. Desde la altura del transbordador, a 260 kilómetros, el MAPS registró la radiación de sucesivas zonas de la superficie terrestre de 20 kilómetros de anchura. Estas zonas exploradas se dividieron en una malla de cinco grados de latitud por cinco grados de longitud. Eliminamos las variaciones de pequeña escala en los datos promediando las múltiples mediciones realizadas dentro de cada cuadro de la retícula.

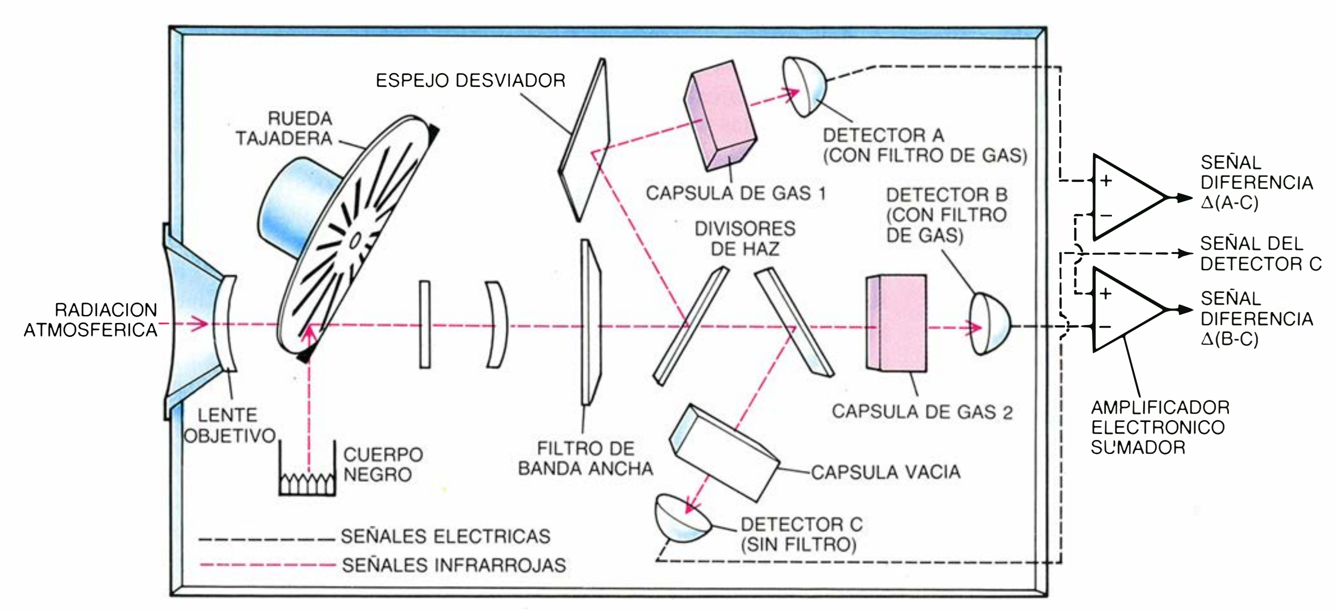
Cuando analizamos así los datos del MAPS, quedamos atónitos ante el cuadro que nos ofrecía la distribución global del monóxido de carbono. Lo menos sorprendente era observar que las concentraciones más bajas, de unas 40 moléculas por mil millones de moléculas de aire, correspondieran a la zona sobre el Pacífico suroriental y de Argentina, donde los vientos soplan del Oeste después de recorrer un largo camino por encima del océano. Dado que los estudios anteriores habían descartado que los océanos fueran fuentes importantes de monóxido de carbono, estos resultados concordaban con lo que se esperaba.

Descubrimos concentraciones mayores de monóxido de carbono, de unas 75 moléculas por mil millones de moléculas de aire, sobre el Mediterráneo oriental y las masas de tierra vecinas. El mismo aire había pasado antes sobre Europa occidental en una época de intensa convección: la combustión de carburantes fósiles era la presumible responsable de esos valores altos.

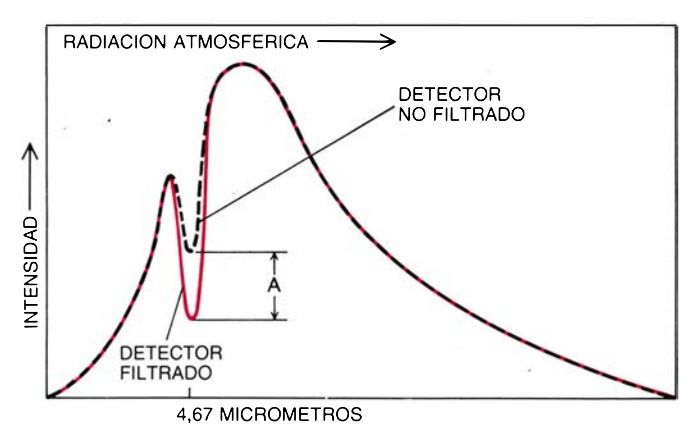
La gran sorpresa se nos presentó, sin embargo, cuando vimos que los valores más altos de monóxido de carbono se habían registrado sobre regiones con poca o nula actividad industrial, ni tráfico automovilístico; muchas de esas zonas caían en el hemisferio Sur o en los trópicos. La parte septentrional de América del Sur, Africa central y China oriental arrojaban niveles superiores a 100 moléculas por mil millones de moléculas de aire. (La medición más alta correspondió al golfo de Guinea, en la costa occidental del Africa ecuatorial, pero quizá se debió a una fluctuación estadística que reflejara el pequeño número de valores aprovechables.)

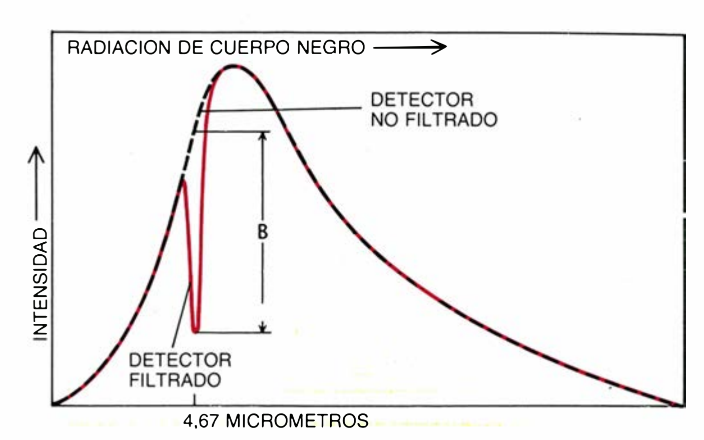
¿De dónde procedía el monóxido de carbono que había sobre esas regiones sin industrializar? Inspeccionamos mapas de las velocidades del viento y recabamos información sobre la actividad convectiva en las regiones observadas durante noviembre. Quedó claro que el aire cargado de monóxido de carbono que se encontraba a 10 o 12 kilómetros por encima de América del Sur y del océano Atlántico ecuatorial se había originado en la capa fronteriza atmosférica baja sobre la pluviselva tropical. El aire sobre China había barrido los bosques húmedos del noroeste de Birmania el día anterior al de la toma de las muestras. El terreno que se extendía bajo la capa fronteriza que medimos, en Africa central correspondía a pastizales y sabana; había pluviselva en un radio de 500 kilómetros.

Era obvio que una fuente distinta de la industria producía nubes de monóxido de carbono en esas zonas sin desarrollar. La proximidad de la pluviselva parecía constituir un elemento común; la quema de vegetación en la sabana podría intervenir también. Dicho de otra manera, las teorías propuestas por Crutzen, Seiler y otros podrían explicar los datos recogidos por el MAPS



3. RADIACION INFRARROJA de la atmósfera: penetra en el radiómetro MAPS y es "fragmentada" por una rueda giratoria con ranuras que introduce destellos de radiación procedente de un cuerpo negro de referencia. Un filtro óptico elimina todas las longitudes de onda, salvo una ventana en torno a los 4,67 micrometros, el máximo de la banda de absorción del CO. Unos espejos dirigen el haz de radiación seleccionada hacia tres detectores. El detector sin filtro reside detrás de una cápsula donde se ha operado el vacío; mide la intensidad absoluta de la radiación. Los otros dos detectores están detrás de cápsulas llenas de CO. La salida del detector sin filtro y las diferencias entre ésta y las de los detectores con filtro de gas se registran para su estudio.





4. PROPORCIONES DE MEZCLA del CO en la atmósfera. Se calculan comparando los espectros atmosférico y de referencia observados por los detectores. Un detector equipado con una cápsula de CO que hace de filtro da una señal baja y casi constante, porque el gas de la cápsula absorbe fuertemente casi toda la radiación que recibe en torno a 4,67 micrometros, cualquiera que sea su fuente. A esa longitud de onda, un detector sin filtro indica la absorción parcial de la radiación (cuando se observa la atmósfera) o absorción nula (lectura del cuerpo negro de referencia). La diferencia *A*, tomada cuando ambos detectores están observando la atmósfera, guarda una relación matemática con la diferencia entre las concentraciones de monóxido de carbono en la atmósfera y en la cápsula. La diferencia *B*, que compara la emisión del cuerpo negro con la absorción en la cápsula, sirve para calibrar el sistema.

durante su primer vuelo en el transbordador espacial. Esperábamos que las medidas de un segundo vuelo confirmasen y ampliasen los descubrimientos iniciales.

Antes del segundo experimento a bordo de la lanzadera, se adaptó el instrumento MAPS para acoplarle un sistema sencillo de detección de nubes. Sólo se llenó entonces una cápsula con monóxido de carbono. Este cambio limitó ligeramente nuestra capacidad para determinar las alturas de los penachos de monóxido de carbono, pero podíamos aceptarlo. La otra célula se llenó de óxido nitroso, que está mezclado con el aire en una proporción casi constante de 305 moléculas por mil millones de moléculas de aire en los 12 kilómetros inferiores de la atmósfera. Al igual que el monóxido de carbono, el óxido nitroso absorbe energía cerca de los 4,67 micrometros. Esta nueva configuración nos permitía medir las proporciones de mezcla de ambos gases: dióxido de carbono y óxido nitroso. Puesto que la proporción de mezcla del óxido nitroso es casi constante, cualquier fluctuación aparente que el instrumento observase había que atribuirla a las nubes que entraran en el campo de observación. Identificando tales fluctuaciones, podríamos reconocer de inmediato y descartar los datos correspondientes de monóxido de carbono, que habrían resultado distorsionados. Esta modificación del instrumento eliminó la tediosa tarea de examinar las fotografías en busca de nubes.

El segundo vuelo del MAPS en el transbordador se produjo en octubre de 1984. Aunque programado para principios de la primavera de ese año, hubo que retrasarlo ante la demora sufrida en el lanzamiento del transbordador. Fue una pena. Hubiéramos preferido que las mediciones tomadas durante la primavera complementasen las realizadas en noviembre de 1981 y nos aportaran algún signo de la variación del monóxido de carbono en el curso del año. Seiler y sus colaboradores habían llevado a cabo una exploración previa del aire desde estaciones de superficie en ambos hemisferios y habían descubierto una manifiesta variación estacional, en la que los máximos niveles del monóxido de carbono coincidían con la primavera local.

En otros aspectos, el segundo vuelo del MAPS en el transbordador espacial representó una mejora sobre el primero. La órbita del transbordador en este vuelo abarcaba un dominio más amplio de latitudes, desde 57 grados Norte hasta 57 grados Sur; las observaciones cubrieron, pues, un área geográfica más extensa. Se recogieron 86 horas de observaciones durante nueve días, con las que se levantaron dos mapas, que ofrecían las distribuciones de la concentración de dióxido de carbono promediadas a lo largo de cuatro y cinco días consecutivos, respectivamente.

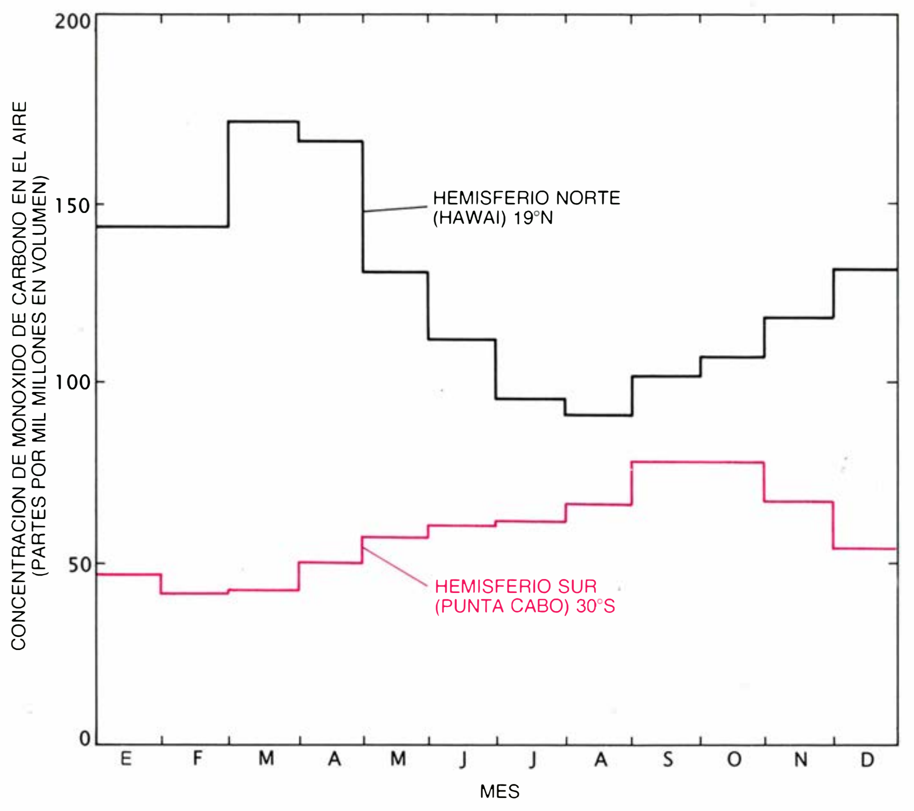
Las pautas de distribución de monóxido de carbono registradas en el vuelo de octubre de 1984 se parecían a las recogidas en noviembre de 1981. Sobre América del Sur, Africa austral, Europa, la URSS, China, el Pacífico septentrional y el Sur del Océano Indico se midieron valores que superaban las 100 moléculas de monóxido de carbono por cada mil millones de moléculas de aire. Los valores más bajos se localizaban sobre el Pacífico tropical, el Atlántico septentrional, el Sahara y Argentina.

Las fotografías tomadas desde el espacio por Kathryn D. Sullivan, astronauta de la NASA, confirmaron la asociación entre grandes incendios visibles desde la órbita y penachos ricos en monóxido de carbono. Se comprobó, en este sentido, que el humo de los incendios cerca de la desembocadura del río Zambeze, en Africa, avanzaba tierra adentro arrastrado por un viento del Este. La convección transportó el humo hasta alturas comprendidas entre 5 y 10 kilómetros, donde el radiómetro MAPS detectó el monóxido de carbono que contenía.

Para calibrar los datos MAPS de 1984, Seiler y su grupo de investigación realizaron gran cantidad de mediciones desde un avión que voló sobre el Océano Atlántico durante la misión del transbordador. El instrumento con el que se obtuvieron esas mediciones estaba en contacto con el aire; era, pues, sensible a proporciones de mezcla inferiores a la molécula de monóxido de carbono por mil millones de moléculas de aire. Las mediciones se realizaron a una altitud de unos 10 kilómetros durante el vuelo de Frankfurt a Sao Paulo y el de regreso.

Las pautas de la distribución Norte-Sur del monóxido de carbono, medidas casi simultáneamente por MAPS y el avión, guardaban una estrecha correspondencia. Las mediciones del avión se manifestaban, sistemáticamente, un 40 por ciento más altas que las del MAPS; la razón de la discrepancia es hoy objeto de estudio.

Todas las mediciones del MAPS y de los aviones sugieren, sin duda, que al menos durante el otoño del hemisferio Norte y la primavera del hemisferio Sur, cuando aquéllas se tomaron, la pluviselva y las sabanas rivalizan o so-



5. SE HAN MEDIDO LAS VARIACIONES ESTACIONALES de los niveles de monóxido de carbono atmosférico en ambos hemisferios. Las medidas del hemisferio Norte se hicieron en el observatorio de Mauna Loa en Hawai; las del hemisferio Sur, en la estación terrestre de Cape Point en el Cabo de Buena Esperanza, en Suráfrica. Cada valor medio mensual se basa en un registro continuo del monóxido de carbono que cubre un período de al menos cinco años. En ambos hemisferios, la proporción de mezcla del monóxido de carbono alcanzó un máximo en la primavera local o cerca de ella, debido al desprendimiento, por los árboles, de grandes cantidades de hidrocarburos que después se oxidaban dando CO.

brepasan a los combustibles fósiles en potencia generadora de monóxido de carbono atmosférico. La combustión y la oxidación de hidrocarburos contribuyen a esta producción. Pese a las semejanzas de los valores más altos registrados en todo el mundo, parece que el monóxido de carbono se libera a través de distintos mecanismos.

La contribución relativa de cada mecanismo en la aportación de monóxido de carbono a la atmósfera varía con el lugar. La oxidación del metano y otros hidrocarburos constituye una fuente importante en ambos hemisferios; el gas desprendido por los procesos bioquímicos del suelo y la vegetación no supone una cantidad muy notable. En general, la combustión de carburantes fósiles es la fuente principal de monóxido de carbono en el hemisferio Norte industrial, mientras que la combustión de biomasa predomina en el hemisferio Sur y en los trópicos.

La cantidad de monóxido de carbono atribuible a la quema de vegetación, mucha de la cual es el resultado de actividades humanas en naciones en vías de desarrollo, plantea cuestiones inquietantes. ¿Cuál es la relación entre la tasa a la cual los bosques pierden carbono por combustión, comparada con la velocidad de incorporación del mismo en los árboles en crecimiento a través de la fotosíntesis y la respiración? ¿Cuáles son las consecuencias ambientales?

La población de las naciones en vías de desarrollo emplea abundantemente la madera como combustible; también la queman para obtener suelos para pastos, agricultura o nuevos asentamientos. Además, el ritmo de incendios está creciendo por culpa de la presión económica y de la apremiante escasez de combustible.

Trabajando a partir de datos estadísticos, Seiler y Crutzen han calculado que entre el 0,5 y el 0,75 por ciento de los bosques tropicales arde cada año. Conforme mengua la base productiva de la masa forestal y las tasas de incendio aumentan, los porcentajes de pérdida de bosques se multiplican. Algunas zonas deforestadas podrán volver a crecer, pero los bosques talados para la agricultura se pierden para siempre.

La desaparición de la pluviselva tropical e incluso una merma notable de su extensión podrían alterar drásticamente el clima al cambiar las distribuciones globales de evaporación y circulación del calor. Los árboles devuelven grandes cantidades de humedad a la atmósfera por medio del vapor de agua que sus hojas desprenden durante el día. Cuando desaparecen los árboles, aumenta la escorrentía y el suelo evapora al aire menos vapor de agua. La evaporación modera también las temperaturas de superficie, absorbiendo energía solar que de otra manera calentaría el suelo. Como resultado de la desaparición de los árboles, las temperaturas se tornarían más extremas.

Tampoco todos los efectos serían locales. La evaporación importa, asimismo, porque constituye una vía eficaz de transportar energía solar hacia grandes altitudes de la atmósfera. Sin evaporación, el calor del suelo es conducido directamente a las capas de la atmósfera inmediatas. Sin embargo, el vapor de agua suele ascender de dos a ocho kilómetros de altura antes de liberar su calor latente condensándose en forma de lluvia. La inyección de calor a esas alturas es uno de los motores de la circulación atmosférica y del tiempo meteorológico en gran escala. Las consecuencias de su alteración resultan difíciles de predecir.

No es fácil tampoco adivinar la manera en que las grandes cantidades de monóxido de carbono producidas por la combustión de biomasa podrían cambiar el clima alterando la química atmosférica. El hidroxilo reacciona prestamente con el monóxido de carbono. Cuando las emisiones de este gas aumentan, el monóxido de carbono consume en proporción más hidroxilo y queda menos para romper el metano y otras moléculas. Esta alteración del equilibrio químico de la atmósfera podría explicar los aumentos de metano atmosférico que se han observado recientemente. El metano y el dióxido de carbono son gases de invernadero. En la atmósfera ayudan a aprisionar calor que, sin él, la Tierra devolvería al espacio. Gran parte de la creciente preocupación sobre un posible cambio climático global debido a la intensificación del efecto de invernadero se ha centrado en los enormes aumentos del dióxido de carbono atmosférico; queda por ver si los aumentos del monóxido de carbono darán por resultado metano suficiente para agravar el problema.

Los niveles de monóxido de carbono favorecen también la formación de ozono a altitudes relativamente bajas. Parece ser que este ozono a baja altitud es una pantalla eficaz contra la dañina radiación ultravioleta. Podría, por tanto, ayudar a contrarrestar los efectos de

la disminución de la capa de ozono estratosférica, que parece estar reduciéndose a causa de reacciones con halocarburos contaminantes. Pese a ello, incluso aumentos bastante pequeños de la concentración de ozono pueden dañar el crecimiento de la vegetación. Quizás estemos viendo los efectos de la exposición al ozono en algunos bosques caducifolios que experimentan ritmos de crecimiento más lentos.

Queda claro, por tanto, que la medida de la producción, circulación y eliminación del monóxido de carbono es una cuestión de vital interés. El instrumento MAPS ha demostrado ya ser una herramienta útil para detectar el monóxido de carbono de la combustión de biomasa, carburantes fósiles y fuentes naturales a grandes altitudes. La repetición del experimento MAPS durante otras estaciones, aparte del otoño del hemisferio Norte, ayudaría a aumentar nuestros conocimientos sobre las variaciones estacionales del monóxido de carbono en ambos hemisferios. Las mediciones ulteriores podrían también rellenar huecos en la cobertura geográfica, especialmente sobre los océanos. Mejoras posteriores en el MAPS podrían aumentar su sensibilidad ante el monóxido de carbono en las capas atmosféricas más bajas, lo que permitiría medidas más directas y fidedignas de combustiones y generación local de monóxido de carbono.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CYCLE OF ATMOSPHERIC CO. W. Seiler en *Tellus*, vol. 26, n.º 116, págs. 118-135; 1974.

ESTIMATES OF GROSS AND NET FLUXES OF CARBON BETWEEN THE BIOSPHERE AND THE ATMOSPHERE FROM BIOMASS BURNING. W. Seiler y P. J. Crutzen en *Climatic Change*, vol. 2. D. Reidel Publishing Co., 1980.

TROPOSPHERIC CHEMISTRY: A GLOBAL PERSPECTIVE. J. A. Logan, M. J. Prather, S. C. Wofsy y M. B. McElroy en *Journal of Geophysical Research*, vol. 86, n.º C8, págs. 7210-7254; 20 de agosto de 1981.

MIDDLE AND UPPER TROPOSPHERIC CARBON MONOXIDE MIXING RATIOS AS MEASURED BY A SATELLITE-BORNE REMOTE SENSOR DURING NOVEMBER 1981. H. G. Reichle, Jr., V. S. Connors, J. A. Holland, W. D. Hypes, H. A. Wallio, J. C. Casas, B. B. Gormsen, M. S. Saylor y W. D. Hesketh en *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, n.º C9, págs. 10865-10887; 20 de septiembre de 1986.

THE DISTRIBUTION OF MIDDLE TROPOSPHERIC CARBON MONOXIDE DURING EARLY OCTOBER 1984. H. G. Reichle, Jr., J. C. Casas, E. P. Condon, V. S. Connors, B. B. Gormsen, J. A. Holland, W. Seiler, R. T. Sherrill y H. A. Wallio en *Journal of Geophysical Research*, en prensa.

El colisionador lineal de Stanford

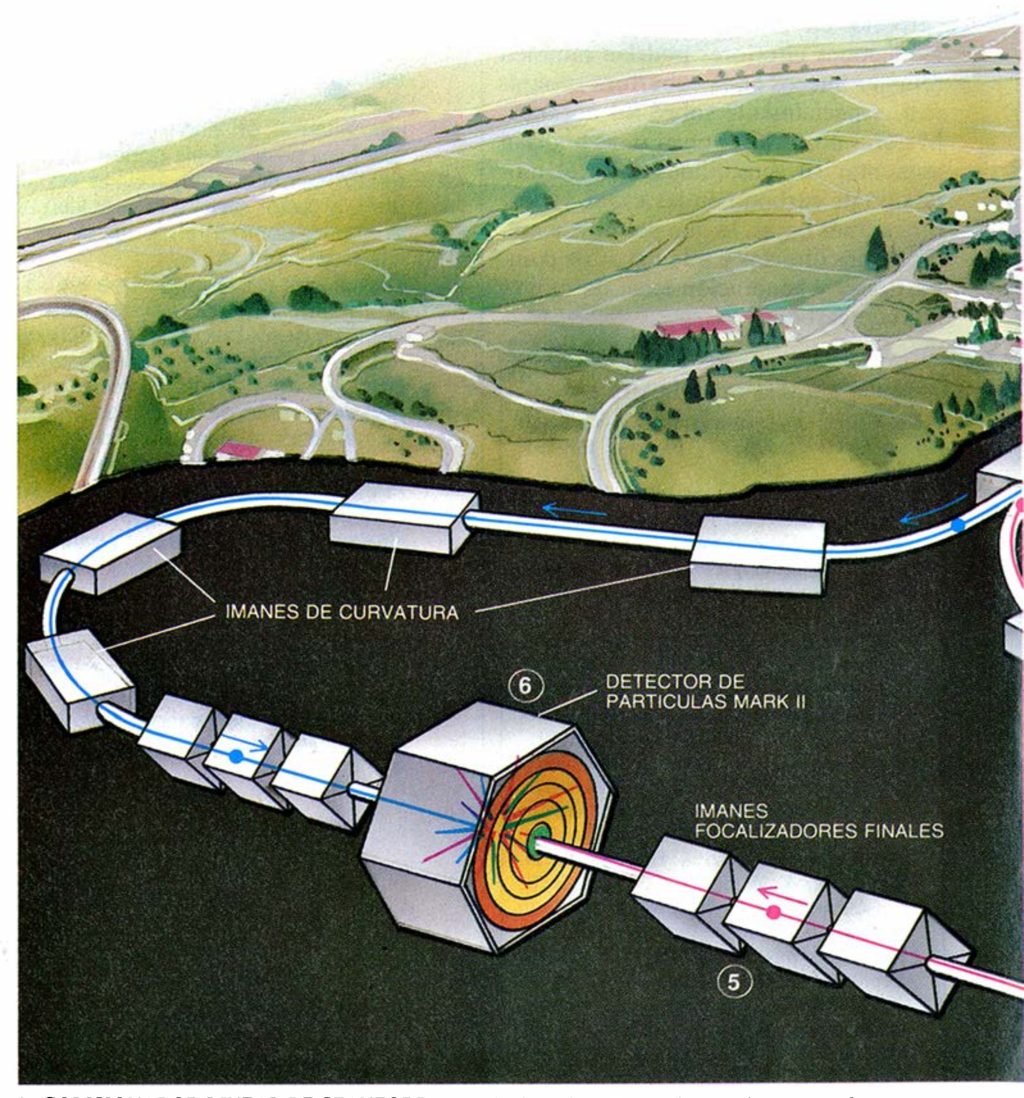
El primer colisionador lineal del mundo ha entrado ya en funcionamiento. La "fábrica de Z^0" de Stanford permite medir con una precisión sin precedentes la masa y la vida media de la partícula Z^0, transmisora de la fuerza electrodébil

John R. Rees

A primera hora de la mañana del martes 11 de abril, el sol comenzaba a disipar la niebla de las verdes colinas que rodean el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), cuando mis colegas del turno de noche partían hacia sus casas. Minutos antes, sin saberlo ninguno de nosotros, una oleada de energía había pasado de repente por la estructura de hierro de tres pisos de altura y de 1800 toneladas de peso que forma el armazón del detector Mark II. El suceso se produjo en menos de un abrir y cerrar de ojos. La mañana siguiente, Barrett Milliken, un becario de postdoctorado del Instituto de Tecnología de California, observó algo insólito cuando estudiaba detenidamente la información del día anterior almacenada en el ordenador. Dos chorros finos de partículas habían surgido del centro y llegado al detector, depositando unos 65.000 millones de electronvolt de energía. Milliken se dio cuenta de que el corto pulso mostraba las inconfundibles características de un Z^0 —partícula que "transporta" la fuerza nuclear débil, una de las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Llegado el mediodía, la noticia había recorrido ya el mundo entero: en el SLAC, habíamos alcanzado por fin la meta que se nos había estado escapando durante casi un año.

Lo interesante del suceso de abril no era tanto la observación del Z^0 (pronúnciese "Z cero"), descubierto seis años atrás, cuanto la creación de la partícula en una máquina, el colisionador lineal de Stanford (SLC), cuyo diseño no tenía precedentes. El SLC provoca la colisión de haces de electrones y positrones (las antipartículas del electrón) de alta energía, un método que ha cosechado frutos espléndidos en el estudio de las interacciones fundamentales de la materia. Ahora bien, desde 1960, fecha en que se empezaron a construir las máquinas, los colisionadores electrón-positrón habían consistido siem-

JOHN R. REES puede considerarse más que sospechoso en el asunto del colisionador lineal de Stanford. Fue él quien dirigió la construcción de la máquina. Rees ha trabajado en el tema de los haces colisionantes desde su inicio: su doctorado por la Universidad de Indiana, en 1956, coincidió con los primeros proyectos de construir anillos de almacenamiento de haces colisionantes. Antes de dedicarse al SLC, Rees trabajó con Burton Richter, director del Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), en el diseño, construcción y funcionamiento de dos anillos de almacenamiento de haces colisionantes del SLAC: SPEAR, el anillo de almacenamiento con el que Richter descubrió el mesón psi que le valió el premio Nobel, y el anillo de almacenamiento PEP, de 15 GeV.

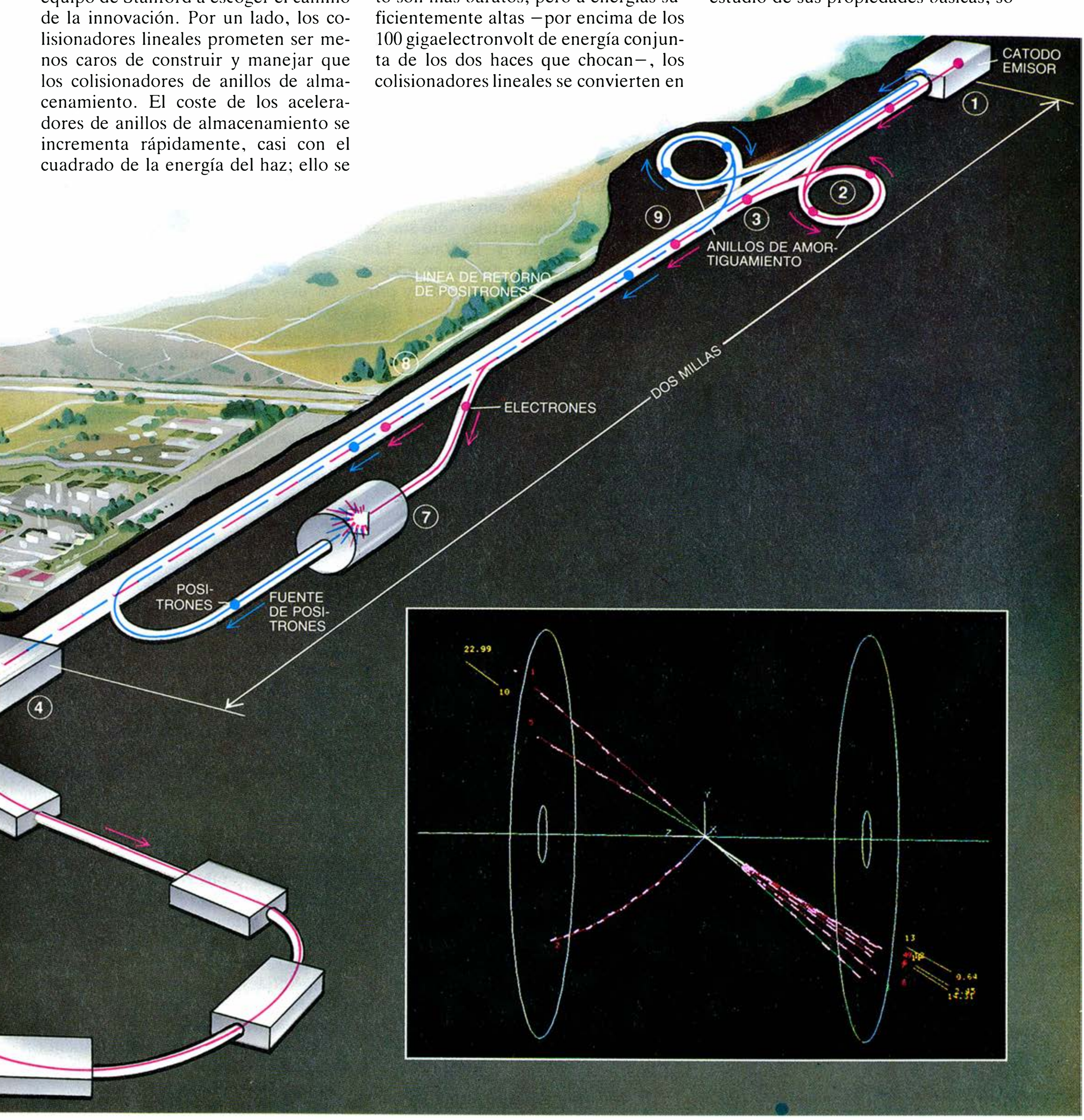


1. COLISIONADOR LINEAL DE STANFORD (SLC). **Acelera electrones (*rojo*) y positrones (*azul*) en un linac, acelerador lineal, de tres kilómetros de longitud y luego los dirige hacia su choque frontal, a una energía conjugada de cerca de 100 gigaelectronvolt (GeV). Un cátodo dispara dos paquetes de electrones en sucesión (*1*). Los paquetes se aceleran hasta 1 GeV y después se condensan en un anillo de amortiguamiento (*2*). Los paquetes amortiguados se inyectan en el linac, donde se juntan con un paquete amor-**

pre en dos haces de partículas que procedían en sentidos opuestos a lo largo de una trayectoria circular; los haces se cruzaban, o colisionaban, en varios puntos a lo largo del circuito, produciendo chorros de nuevas partículas. Rompiendo con la tradición, el SLC dirige dos haces lineales uno contra otro.

Poderosos motivos impulsaron al equipo de Stanford a escoger el camino de la innovación. Por un lado, los colisionadores lineales prometen ser menos caros de construir y manejar que los colisionadores de anillos de almacenamiento. El coste de los aceleradores de anillos de almacenamiento se incrementa rápidamente, casi con el cuadrado de la energía del haz; ello se debe, en parte, a que, cuanto mayor sea la energía de la partícula cargada, mayor será la energía que emite en forma de radiación de sincrotón cuando se le obliga a seguir una trayectoria curva. Por el contrario, el coste de los aceleradores lineales aumenta sólo linealmente con la energía del haz. A bajas energías, los anillos de almacenamiento son más baratos, pero a energías suficientemente altas —por encima de los 100 gigaelectronvolt de energía conjunta de los dos haces que chocan—, los colisionadores lineales se convierten en los menos caros. (Un gigaelectronvolt, o GeV, representa 10^9 electronvolt.)

Un motivo igualmente poderoso fue la voluntad de construir una "fábrica de Z^0", un dispositivo donde se pudiera estudiar con detenimiento la partícula Z^0. Esta partícula se descubrió en 1983, en el CERN, el Laboratorio Europeo de Física Nuclear, cercano a Ginebra; el estudio de sus propiedades básicas, so-



tiguado de positrones (*3*). El primer paquete de electrones y los positrones se aceleran hasta el final del linac, donde se desvían hacia dos grandes arcos (*4*): los electrones hacia la izquierda y los positrones hacia la derecha. Los imanes guían los haces hasta la focalización final, donde los haces se comprimen hasta un diámetro de unas pocas micras (*5*). Los haces colisionan en el detector de partículas Mark II (*6*). Mientras tanto, el segundo paquete de electrones se desvía hacia un blanco para producir una lluvia de positrones (*7*), que se envían al principio del linac (*8*), donde se amortiguan y se inyectan en el linac, al mismo tiempo que un nuevo grupo de electrones (*9*). El primer Z^0 visto en el SLC (*recuadro*) se desintegró en un quark y un antiquark.

bre todo su masa y su vida media, constituye hoy uno de los principales objetivos de los físicos de partículas. En 1983, los ingenieros del CERN empezaron la excavación de su propia fábrica de Z^0, el gran colisionador electrón-positrón (LEP), un anillo de almacenamiento tradicional de 27 kilómetros de circunferencia. Mientras tanto, los físicos del SLAC decidieron convertir el acelerador lineal de Stanford de tres kilómetros de longitud, o *linac* –el mayor del mundo– en un colisionador lineal que pudiera producir Z^0. Potenciando un linac ya existente, en vez de construir nuevos linacs desde los cimientos, el grupo del SLAC esperaba conseguir la primera fábrica de Z^0 del mundo y a un coste económico.

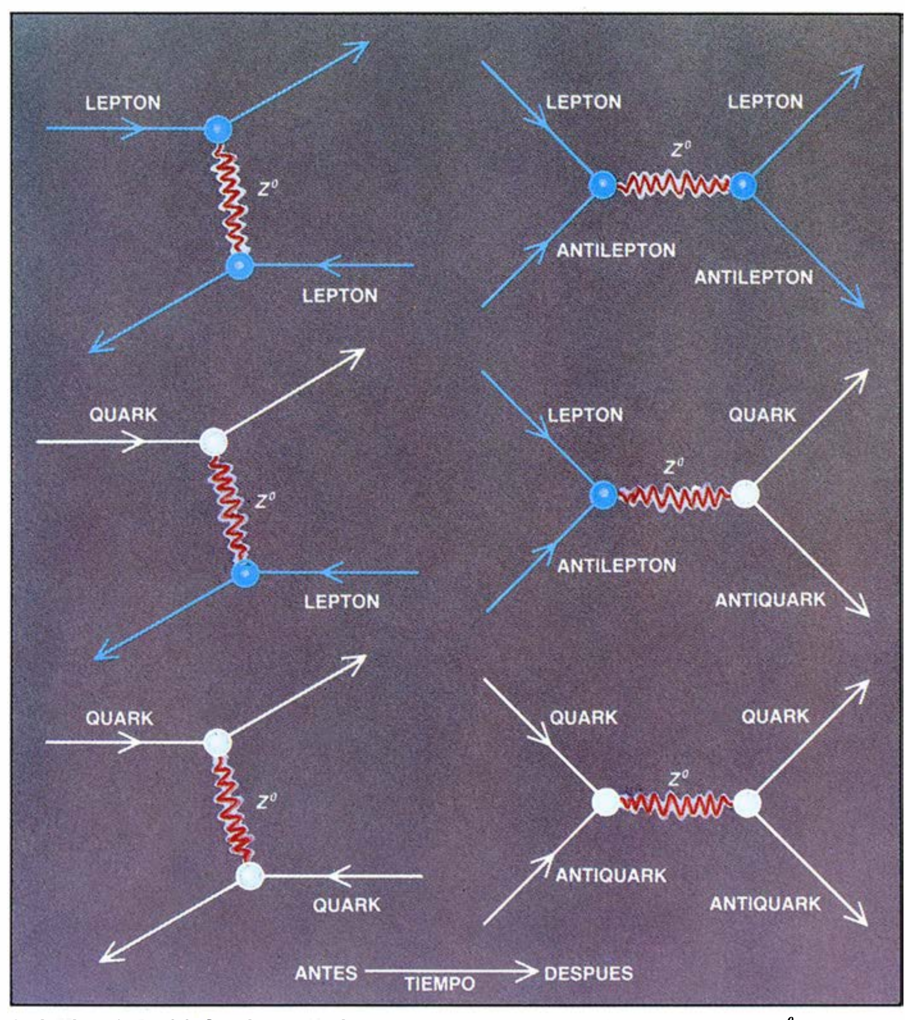
Hasta entonces no se había construido ningún colisionador lineal. Apremiaba, además, la urgencia de convertirse en los primeros. Unida al interés de toda innovación estaba la otra cara de la moneda: el riesgo. En el SLAC optamos por la aventura de adentrarnos en un territorio inexplorado, donde sabíamos que encontraríamos sorpresas y sinsabores. Al final, el riesgo valió la pena. Se han detectado más de 200 partículas Z^0 en el SLC y siguen apareciendo otras de manera regular.

¿Qué es el Z^0? ¿En qué radica su interés? Antes de responder, es necesario conocer el modelo actual de explicación de la materia y las fuerzas físicas. Toda la materia del universo está construida por un puñado de piezas fundamentales. Esto es lo que los físicos –o la mayoría de ellos– creen. La materia se divide y subdivide hasta el nivel de las piezas fundamentales, pero aquí el proceso termina. Las partículas elementales no pueden subdividirse más. (Por ello son elementales.) Las partículas elementales sólo son de dos tipos: quarks y leptones. Los quarks se mantienen unidos en grupos de tres, para formar neutrones y protones. Los neutrones y protones (que se conocen como hadrones) se asocian en grupos, para formar núcleos atómicos. A un núcleo se le une un enjambre de electrones –que son leptones– y da lugar a un átomo. (Los otros leptones incluyen muones y neutrinos.) El proceso continúa: los átomos se unen para dar moléculas, y éstas originan gases, líquidos y sólidos.

El número de partículas elementales es muy pequeño: sólo seis quarks y seis leptones, de acuerdo con las teorías actuales. (En realidad, las teorías actuales necesitan también de otra partícula, el bosón de Higgs, pero las interacciones entre las partículas elementales se pueden explicar sin referirse a él.) Los quarks y los leptones se agrupan en tres "generaciones" de dos quarks y dos leptones cada una. Esto nos lleva a 12 constituyentes elementales (sin contar el Higgs), o 24 si tenemos en cuenta sus antipartículas. Pero, ¿qué les hace mantenerse unidos? Los ladrillos son de poca utilidad sin el cemento. Ha costado tanto encontrar una respuesta satisfactoria a esta pregunta como la de conocer el conjunto completo de partículas elementales. Desde el siglo XIX, la atracción y repulsión entre las partículas se han descrito a través de las fuerzas que las partículas ejercen entre sí. Una teoría completa debe incluir no sólo las partículas elementales, sino también el mecanismo de sus interacciones.

La teoría de la relatividad especial estipula que un efecto físico no puede propagarse más deprisa que la velocidad de la luz. Así, los físicos desarrollaron la teoría cuántica de campos, en la que la fuerza entre dos partículas es el resultado del intercambio de un "intermediario" que "transporta la fuerza" a una velocidad finita: una de las partículas emite el intermediario; la otra lo absorbe. El intermediario se propaga a través del espacio y, durante un breve tiempo, no está unido ni con la partícula emisora ni con la que lo recibe. Estos intermediarios presentan las mismas propiedades de masa, carga eléctrica y espín que tienen las partículas elementales; por esa razón los físicos los llaman a menudo partículas, aunque su papel en la naturaleza difiere del desempeñado por las partículas elementales. Los intermediarios son el cemento que mantiene unidos los bloques constituyentes.

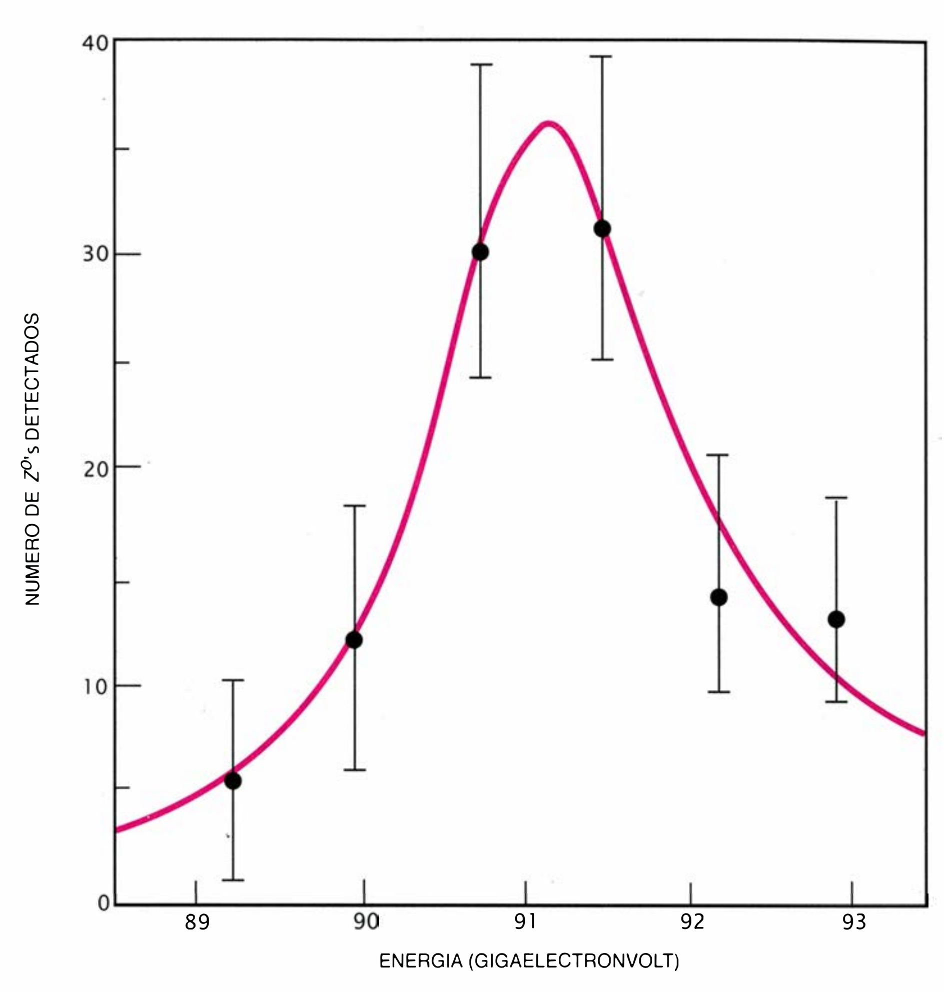
Una teoría completa de la materia constaría, pues, de una lista de las partículas elementales y de una descripción de todas las maneras en que las partículas interactúan a través de los intermediarios. Una teoría así explicaría la existencia y el comportamiento de la materia, al menos en principio. Las le-



2. SEIS INTERACCIONES DEBILES en las que interviene la partícula intermediaria Z^0 se describen en estos diagramas de Feynman. La distancia se representa en un eje y el tiempo en el otro. La teoría predice que si pueden suceder los procesos de la columna izquierda, entonces también lo pueden hacer los de la columna derecha. Las colisiones entre un leptón y un antileptón (los dos sucesos superiores de la columna derecha) pueden producir tanto un leptón y un antileptón como un quark y un antiquark. El acelerador lineal está diseñado para permitir el estudio de estos dos tipos de interacción.

yes se conocerían exactamente, aunque en muchas situaciones reales quizá no se pudieran resolver las ecuaciones o realizar todos los cálculos que se requerirían para desentrañar el comportamiento del sistema. (Esto puede parecer extraño; sin embargo, suele suceder, en física, que se conozcan las leyes y las capacidades de cálculo no sean suficientes para encontrar soluciones a problemas reales. Un ejemplo sencillo: sabemos qué ecuaciones termodinámicas gobiernan la atmósfera terrestre, pero carecemos de suficiente potencia de computación para predecir el tiempo de forma precisa.)

Los físicos creen que está a punto de consolidarse, como fruta madura, una teoría completa de la materia. Explica ésta muy bien el comportamiento de las fuerzas que mantienen unidos los núcleos, los átomos y las moléculas. Goza de tanto éxito y recibe tan amplia aceptación que se la llama sencillamente modelo estándar. La única fuerza que el modelo no es capaz de abarcar es la gravitación; los teóricos trabajan con ahínco por incorporar esa omisión. Mientras tanto, los físicos de partículas se esfuerzan por verificar la teoría existente hasta donde les es posible. Entre otras cosas, han de medir las propiedades de cada partícula elemental y de cada intermediario. Es en la medición de las propiedades del intermediario Z^0, donde el SLC tiene una importante tarea a cumplir.



3. RESONANCIA DEL Z^0 medida en el acelerador lineal de Stanford. Indica que la masa de la partícula es 91,2 GeV. La curva ha sido suministrada por Jonathan Dorfan, del grupo del detector Mark II.

Conocemos la existencia de tres tipos de intermediarios: fotones, gluones y los intermediarios de la fuerza débil. Corresponden a tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Los fotones propagan la fuerza electromagnética; los gluones propagan la fuerza nuclear fuerte, que mantiene unidos los quarks; los intermediarios de la fuerza débil propagan la fuerza nuclear débil, que rige la desintegración radiactiva. Podría haber un cuarto tipo de intermediario, el gravitón, para la fuerza gravitatoria, pero aún no se ha observado.

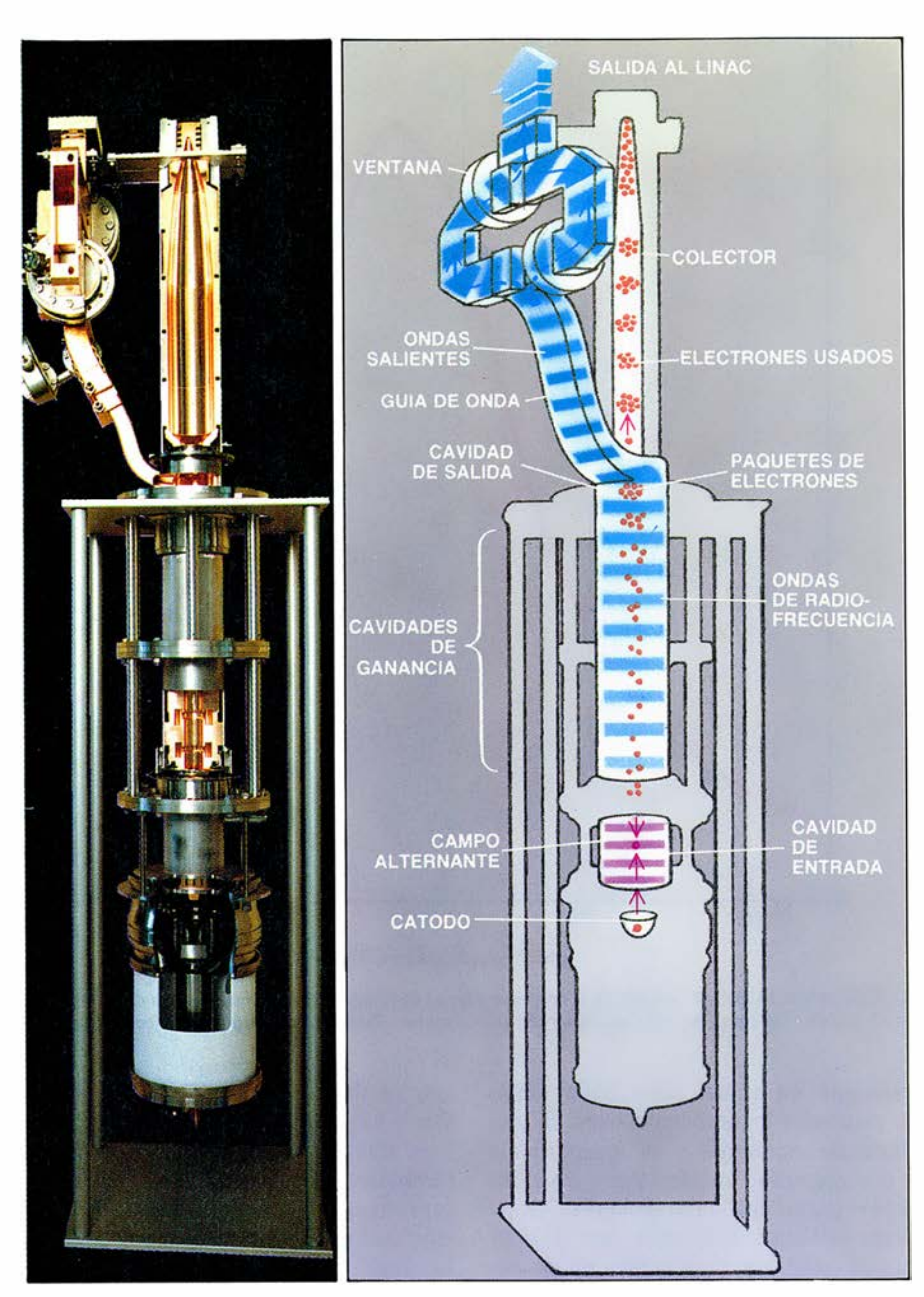
Los fotones y gluones han constituido, durante años, objeto de experimentación, que ha aportado una notable cantidad de información sobre los mismos. Pero los intermediarios de la fuerza débil son todavía suelo desconocido. Su existencia no se comprobó hasta 1983, en el CERN. Hay tres intermediarios de la fuerza débil: W^+, W^- y Z^0. De ninguno de ellos se conocen sus pormenores, situación explicable porque resulta difícil estudiarlos con los aceleradores que han precedido al SLC.

Para entender ese estado de cosas, conviene, en primer lugar, saber cómo se producen los intermediarios. Si una partícula elemental y su antipartícula —por ejemplo, un electrón y un positrón— pasan una cerca de la otra, o, en otras palabras, colisionan, una de ellas puede emitir un Z^0, y la otra puede absorberlo. Según el modelo estándar, puede suceder un fenómeno distinto. Si las partículas poseen suficiente energía, una de ellas, por ejemplo el electrón, puede emitir un Z^0, y entonces el positrón puede absorber al electrón: las partículas se aniquilan entre sí, dejando el Z^0 momentáneamente libre. Luego, el Z^0 se desintegra en un par de partículas elementales: un electrón y un positrón, o un quark y un antiquark.

El colisionador protón-antiprotón del CERN y el tevatrón del laboratorio del acelerador Fermilab de Batavia, Illinois, producían Z^0 haciendo chocar protones y antiprotones, constituido, cada uno de ellos, por tres quarks. Una colisión protón-antiprotón es, pues, equivalente a varias colisiones simultáneas quark-antiquark. Cualquier Z^0 producido en el proceso se desintegra, con mayor probabilidad, en hadrones; mas, por desgracia, hay otros tipos de interacciones entre quarks que producen también una lluvia de hadrones. Por tanto, estas máquinas no se limitan a producir Z^0, sino que desencadenan también otras muchas reacciones que reproducen los modos de desintegración de los Z^0 y, por tanto, enmascaran la presencia de sucesos en los que intervienen realmente los Z^0. En consecuencia, de los Z^0 producidos en el CERN y en el Fermilab, sólo una pequeña fracción —los que se desintegran en leptones— pueden identificarse.

En el SLC, por el contrario, colisionan dos partículas elementales: un electrón y un positrón. Está diseñado específicamente para producir un copioso número de Z^0 y muy pocos sucesos de otro tipo, de suerte que casi cada Z^0 producido puede detectarse, en todos sus modos de desintegración. Los físicos de partículas necesitan estudiar un elevado número de Z^0 para realizar una medida precisa de la masa, la vida media y otras propiedades de la partícula. Con fuentes como el SLC y el LEP, el Z^0 será el primero de los intermediarios de la fuerza débil que tenga sus propiedades completamente determinadas.

Una de las primeras metas del programa experimental del SLC consiste en



4. KLISTRON DE 67 MEGAWATT, el más potente del mundo. Suministra la potencia para acelerar las partículas en el SLC. Los electrones se expulsan desde el cátodo, se focalizan en un haz y se inyectan en la cavidad de entrada. Un campo eléctrico alternante de la pared de la cavidad provoca la aceleración de algunos electrones y el frenado de otros. Los electrones más rápidos alcanzan a los más lentos y forman un paquete denso en el momento en el que llegan a la cavidad de salida. Las ondas de los electrones del paquete generan ondas de radiofrecuencia que son desviadas hacia una guía de ondas. Los electrones usados se depositan en el colector. La energía de radiofrecuencia se divide luego en dos canales y atraviesa ventanas cerámicas de aluminio, para alcanzar una guía de onda que dirige la potencia hacia el linac.

determinar la masa de Z^0 con la máxima precisión posible. Los intermediarios están entre los componentes básicos del modelo estándar, y por ello sus masas son constantes fundamentales; es decir, las masas no pueden calcularse a partir del modelo, sino que deben medirse directamente. ¿Cómo se determina la masa? El proceso de creación del intermediario resulta ser "resonante": cuanto más cercana sea, a la masa en reposo del Z^0, la energía total de las dos partículas que colisionan mayor será la probabilidad de crear un Z^0. Los experimentadores hacen colisionar partículas de energías próximas al valor esperado de la energía equivalente a la masa en reposo del Z^0 y representan el número de partículas Z^0 observadas. El resultado presenta un pico, cuya cima se encuentra a 91,2 GeV, el valor actual de la masa en reposo del Z^0 medido en el SLC [*véase la figura 3*].

La morfología de la curva de resonancia del Z^0 importa por otra razón: la anchura del pico es una medida del número de familias diferentes de partículas elementales que existen. ¿Por qué? Como he explicado antes, la aniquilación electrón-positrón deja un Z^0 libre, que se desintegra tras la más breve de las vidas: unos 10^{-25} segundos. Si imaginamos que el Z^0 es un cubo lleno de agua, cuanto mayor sea el número de agujeros que abramos en el cubo, antes se vaciará. De forma similar, cuanto mayor sea el número de modos diferentes en que el la partícula Z^0 pueda desintegrarse, más pronto lo hará. Así, pues, midiendo la vida media del Z^0, se conoce cuántas familias de partículas elementales existen. Me he referido a la anchura de la curva de resonancia; ¿cuál es su relación con la vida media? Aquí debemos apelar al principio de incertidumbre de la mecánica cuántica: el principio afirma que la anchura de la resonancia —la incertidumbre en la energía del Z^0— guarda una relación inversa con la vida media de la partícula que se desintegra.

¿Qué implica la anchura de la curva de resonancia para el modelo estándar? Según éste, hay seis quarks y seis leptones. Sin embargo, el Z^0 no puede desintegrarse en un par arbitrario de partículas. La masa conjunta de las partículas resultantes no puede ser mayor que la masa del Z^0; en caso contrario, el proceso violaría la conservación de la energía. Ya se sabe que 11 de las 12 partículas elementales tienen masas lo suficientemente pequeñas para ser producidas a pares por el Z^0. En coherencia con esta premisa, los teóricos predicen que la curva de resonancia tendrá una anchura de 2,5 GeV. Si la anchura fuera mayor, implicaría que hay otros tipos de quarks y leptones, además de los que actualmente abarca el modelo estándar, formando una cuarta generación de partículas elementales. Algunos físicos piensan que los neutrinos asociados a una cuarta generación podrían dar cuenta de la "masa oculta" del universo [véase "Los aceleradores, bancos de pruebas de la teoría cosmológica", por David N. Schramm y Gary Steigman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1988]. En el momento en que este artículo va a la imprenta, la cuestión permanece abierta.

El SLC ofrece, pues, grandes posibilidades experimentales. Proporciona la primera oportunidad de estudiar cada modo de desintegración del Z^0, lo que no podía llevarse a cabo con un colisionador protón-antiprotón, por culpa de las fuertes señales de fondo. El SLC permitirá también contabilizar, por primera vez y de manera completa, todas las partículas elementales cuyas masas son menores que la mitad de la del Z^0. El SLC nos proporcionará también una fuente abundante de productos de desintegración del Z^0 y, por ello, se con-

vertirá en un excelente laboratorio donde estudiar esas mismas partículas. Un programa experimental para estudiar todas estas facetas promete tener el SLC ocupado durante los próximos años.

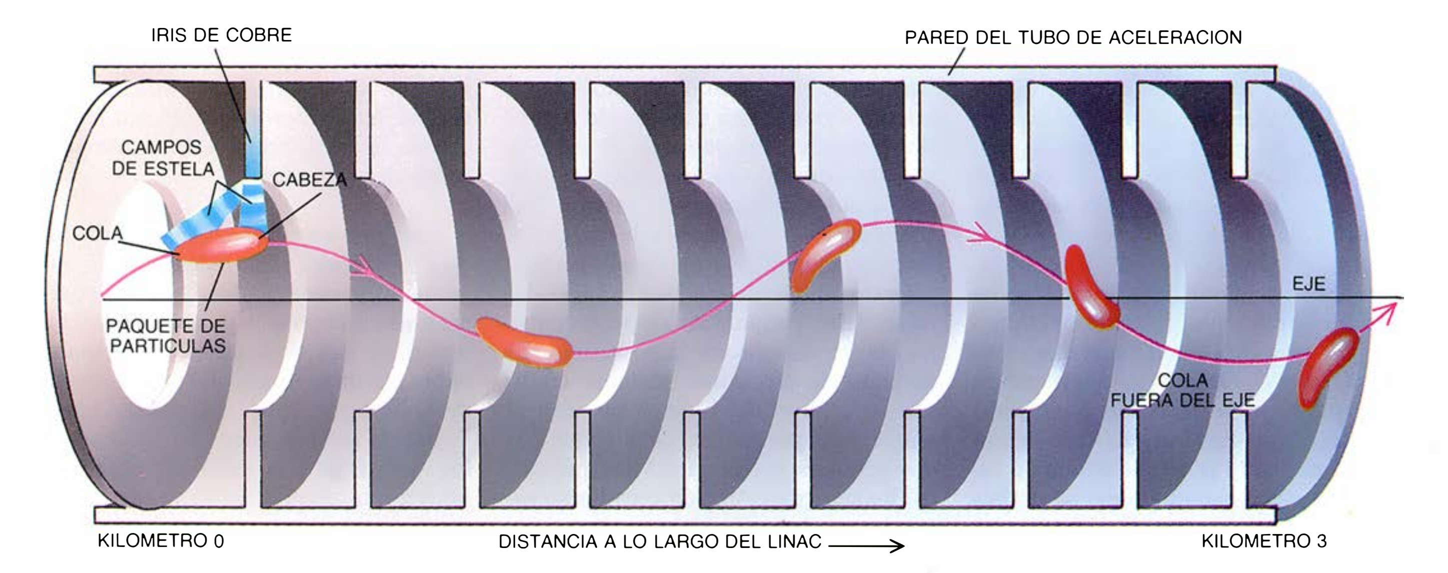
La física que se desarrollará en conjunción con el SLC adquirirá especial relieve: compartirá los objetivos que perseguirán los físicos de Europa con el colisionador LEP. Pero hay otro aspecto significativo en el SLC: al ser el primer colisionador lineal construido, representa el triunfo de la física de aceleradores —la relacionada con la construcción de máquinas que puedan alcanzar las extraordinarias condiciones en las que se forjan partículas exóticas.

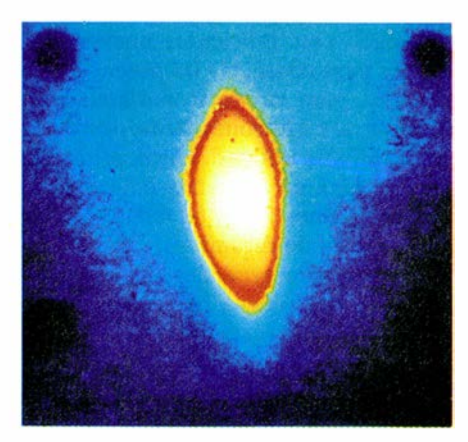
El modelo más simple de colisionador lineal constaría de dos linacs, cuyos haces de partículas apuntaran uno contra el otro: una hazaña parecida a la de lograr el choque de dos balas de dos rifles enfrentados y a grandes distancias. Resulta mucho más difícil construir un colisionador lineal que un acelerador de anillos de almacenamiento de características equivalentes; por múltiples razones. En un anillo de almacenamiento, las partículas giran repetidamente alrededor del anillo y encuentran hasta cerca de 10.000 ocasiones por segundo para colisionar con partículas que procedan en sentido contrario. Las partículas de un colisionador lineal tienen sólo una ocasión cada vez que la máquina dispara. El SLC puede disparar unas 100 veces en un segundo. Para compensar la baja frecuencia de colisión de los haces, los paquetes de partículas deben centuplicar la densidad de los haces de un colisionador de anillos de almacenamiento. Para conseguirlo, hemos tenido que concentrar unos 50.000 millones de partículas en cada paquete y focalizarlo en un diámetro de algunos micrometros. Hablaremos de ello más tarde.

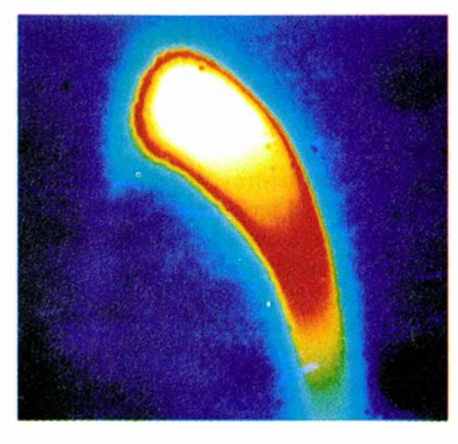
En el SLC, esta dificultad se sumaba a otro inconveniente de partida: habíamos acomodado el nuevo diseño en una máquina de 20 años de antigüedad. El linac original se había fabricado para alcanzar especificaciones menos rigurosas que las requeridas en un colisionador lineal. Es más, usar el linac significaba que empezaríamos acelerando los electrones y los positrones en el mismo sentido y luego entregarnos a una delicada maniobra que llevara los haces a su colisión. Así, separamos los haces con un simple dipolo magnético situado en el extremo final del linac, provocando el giro de los electrones hacia la izquierda y el de los positrones hacia la derecha. Los haces divididos se guiaban después alrededor de dos grandes arcos que entraban en contacto en las puntas, como un par de tenazas gigantes.

Los haces de electrones son de construcción sencilla. Se pulsa un gran cátodo durante un breve instante. Se emite entonces un corto flujo de electrones hacia adelante que se introduce por el principio del linac donde, mediante la acción de campos electromagnéticos aceleradores, los electrones se reunen rápidamente en pulsos cortos e intensos. Cuesta más producir el haz de positrones: un paquete de electrones altamente energéticos se dispara contra un blanco, y se seleccionan los positrones de entre la lluvia de partículas resultante.

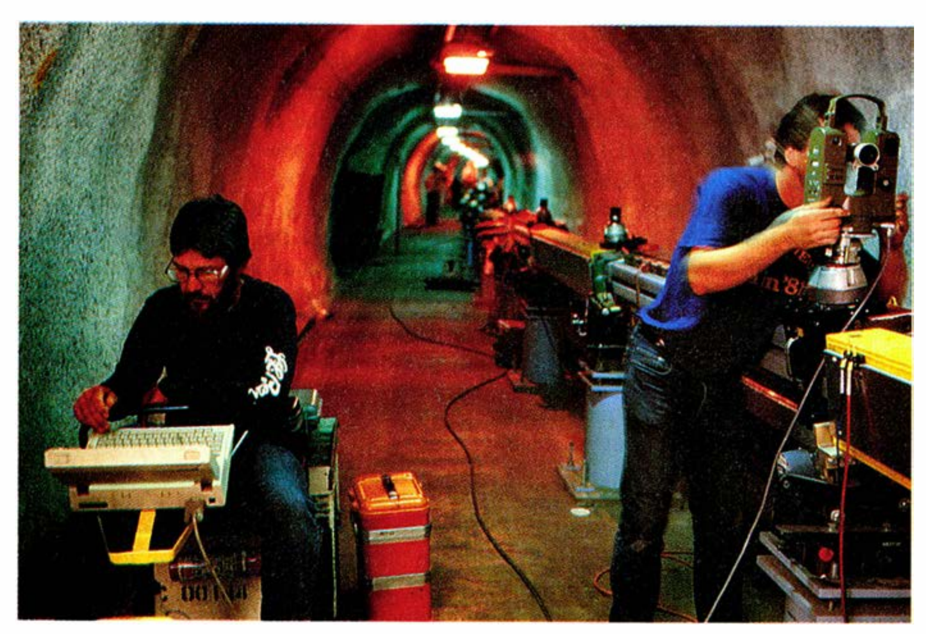
Aunque tanto los pulsos de electrones como los de positrones tienen el número necesario de partículas, son demasiado difusos. Si los dejáramos colisionar, no producirían muchas interacciones; volviendo a la analogía anterior: sería como disparar, enfrentadas, dos escopetas de perdigones, en vez de rifles de precisión, con los disparos esparcidos por una amplia área. Para obtener paquetes de suficiente







5. EFECTO DEL CAMPO DE ESTELA: aparece cuando un paquete de electrones induce campos electromagnéticos en las paredes del tubo de aceleración, los cuales, a su vez, pueden perturbar los electrones de la cola del paquete (*arriba*). Si el paquete viaja de manera precisa por la línea central, el efecto del campo de estela se cancelará por simetría; pero, si el haz está descentrado, el efecto en cuestión perturbará la alineación de la cola. Las pantallas de televisión muestran secciones transversales de un haz correctamente focalizado (*abajo, a la izquierda*) y de un haz distorsionado por el efecto del campo (*abajo, a la derecha*). El centro del haz aparece en blanco; los bordes, en color. El haz alcanza unos 250 micrometros de diámetro.



6. IMANES DEL ACELERADOR LINEAL DE STANFORD, alineados con una precisión de 100 micras con el fin de asegurar el control preciso de los haces cuando éstos colisionan. Un ingeniero mide las posiciones de los imanes con un instrumento de control, mientras su colega informatiza los datos.

densidad, hemos de reducir sus dimensiones transversales, de manera que las partículas que los forman estén más juntas. Este proceso de condensación se realiza en dos pequeños anillos de almacenamiento, o anillos de "amortiguamiento". Los paquetes de partículas se aceleran hasta cerca de 1 GeV; entonces, se inyectan en los anillos, donde la anchura transversal de los paquetes se comprime en buena proporción. El proceso es similar al enfriamiento de un gas: a medida que las partículas emiten radiación de sincrotrón en un anillo de amortiguamiento, se acorta la distancia media entre ellas.

Los electrones y los positrones permanecen en los anillos de amortiguamiento durante una fracción de segundo. Los paquetes —todavía a una energía de 1 GeV— se vuelven a inyectar en el linac; aquí se aceleran a mayores energías, a medida que recorren su longitud, mediante potentes ondas de radiofrecuencia; cada paquete se desliza en la cresta de una onda. Cuando los paquetes de partículas alcanzan el extremo final del linac, portan la energía deseada —unos 50 GeV—, se desvían hacia dos grandes arcos y se promueve la colisión. En la etapa final del trayecto, cada paquete atraviesa un sistema de lentes magnéticas, que los comprime hasta llevarlos a la mínima dimensión transversal posible, justo antes de que los paquetes choquen en el llamado punto de interacción.

Me he limitado a describir un ciclo del funcionamiento del SLC. En la práctica, el acelerador repite este ciclo muchas veces por segundo. Para conseguir que nuestro linac cumpla varias funciones, recurrimos a una coreografía algo fantasiosa. En cada ciclo, el cátodo se dispara dos veces en rápida sucesión, produciendo así dos paquetes de electrones. Éstos avanzan por el linac y se juntan con un grupo de positrones (el lector verá dentro de poco de dónde proceden los positrones), y los tres paquetes, distantes entre sí unos 20 metros, entran en el anillo de amortiguamiento durante una fracción de segundo. Entonces, los paquetes se extraen y se introducen, uno tras otro, en el linac, con los positrones en cabeza. Recorridos unos dos tercios del trayecto, un pulso magnético muy rápido lanza el último paquete de electrones fuera del linac. Este paquete se dispara contra un blanco para producir positrones. El paquete de electrones restante continúa a lo largo del linac, junto con el paquete de positrones; finalmente, los dos paquetes colisionan. Mientras tanto, los positrones recién creados se reconducen al punto de partida y se inyectan en el linac en el momento en que dos nuevos paquetes de electrones empiezan su trayecto. En ese momento, la máquina ha realizado el ciclo completo. El ciclo se repite unas 60 o 120 veces por segundo.

Los constructores del SLC hubieron de salir al paso de nuevos desafíos en física de aceleradores. Para conseguir aceleración a altas energías en un linac, y lograr al mismo tiempo operar de manera estable con un haz denso, debían encontrar nuevos métodos, más allá de los establecidos hasta entonces.

En primer lugar, el linac del SLAC debía aumentar su energía máxima de los 30 hasta los 50 GeV, lo que requería campos eléctricos aceleradores mayores que los anteriormente conseguidos en un linac. El túnel de vacío de tres kilómetros de longitud en el que se acelera el haz soportaba fácilmente estos campos elevados. El problema residía en los klistrones, los tubos de seis pies de alto que generan la potencia de radiofrecuencia necesaria para dirigir los campos. Antes incluso que el SLC se construyera, los klistrones de SLAC producían la máxima potencia de punta —35 megawatt— de todos los klistrones habitualmente fabricados en el mundo, pero no alcanzaban la potencia suficiente. Los físicos de SLAC tuvieron que diseñar un nuevo klistrón que pudiera producir 67 megawatt.

La fabricación de los klistrones reviste especial complejidad, lo que explica el número elevado de fracasos. Necesitábamos cientos de klistrones, y aún así, al principio, sólo un descorazonador 30 por ciento de los construidos funcionaban bien. Otro serio problema fue el de las ventanas cerámicas de aluminio; a través de éstas, la potencia generada escapa de la guía de onda del klistrón hacia el linac y quedaban destrozadas bajo la liberación explosiva de energía. Los primeros esfuerzos para mejorar los klistrones resultaron desalentadores. Muchos observadores temieron que el SLC nunca crearía haces de energía suficiente para producir partículas Z^0.

Uno por uno fuimos superando los obstáculos. El problema de las ventanas se resolvió dividiendo la energía entre dos canales y descargándola a través de dos ventanas: cada ventana había entonces de sopotar sólo la mitad de los megawatt de potencia. Arduos esfuerzos para mantener la calidad de los materiales y la mano de obra permitieron al equipo del SLAC incrementar el rendimiento de manufacturación hasta un 85 por ciento. Cuando el SLC empezó sus primeras pruebas, estaba equipado con suficientes nuevos klistrones para conseguir las potencias necesarias para producir partículas Z^0. Los nuevos klistrones demostraron su extrordinaria utilidad. Hacia principios de este año, en el SLAC se habían construido ya unos 500 y se tenía una amplia reserva de recambios.

Un segundo gran desafío fue crear haces de electrones y positrones de una densidad sin precedentes. En el punto de interacción, el diámetro de la sección transversal del haz es sólo de unas

micras y la densidad de partículas es casi tan grande como la de moléculas en un gas en condiciones normales de presión y temperatura. Esto puede parecer trivial -y ciertamente, para un gas de moléculas corrientes, lo es– mas resulta extraordinario para electrones y positrones. Los haces de tales partículas cargadas suelen ser unas mil veces menos densos, porque se producen en condiciones de elevada temperatura; los electrones se obtienen de un cátodo, y los positrones se crean en una interacción a alta energía. En virtud de ello se mueven hacia adelante y atrás en la trayectoria prevista, en un estado de gran desorden.

Para comprimir los haces desordenados, los diseñadores del SLC propusieron un nuevo tipo de dispositivo, los anillos de amortiguamiento que he mencionado antes. A medida que las partículas radian energía en los anillos de amortiguamiento, sus movimientos de vaivén se reducen o amortiguan. El diseño de tales anillos era toda una novedad. Los ingenieros se las vieron y se las desearon en el proyecto de los "imanes extractores", que aplican un pulso magnético agudo para extraer las partículas de los anillos. A fin de conseguir un ritmo máximo de 120 ciclos por segundo, debe haber, en cada momento, dos paquetes en los anillos de almacenamiento. Como cada paquete realiza un circuito completo en sólo 800 nanosegundos (800 veces 10^{-9} segundos), el desafío consiste en crear pulsos de suficiente agudeza para desviar uno de los paquetes sin interferir con el otro. Para lograrlo, el pulso debe encenderse y apagarse en unos 50 nanosegundos –el tiempo que emplea la luz en recorrer 15 metros. Los ingenieros del SLC están todavía trabajando para conseguir imanes extractores que lo logren. Mientras tanto, la máquina opera a 60 ciclos por segundo.

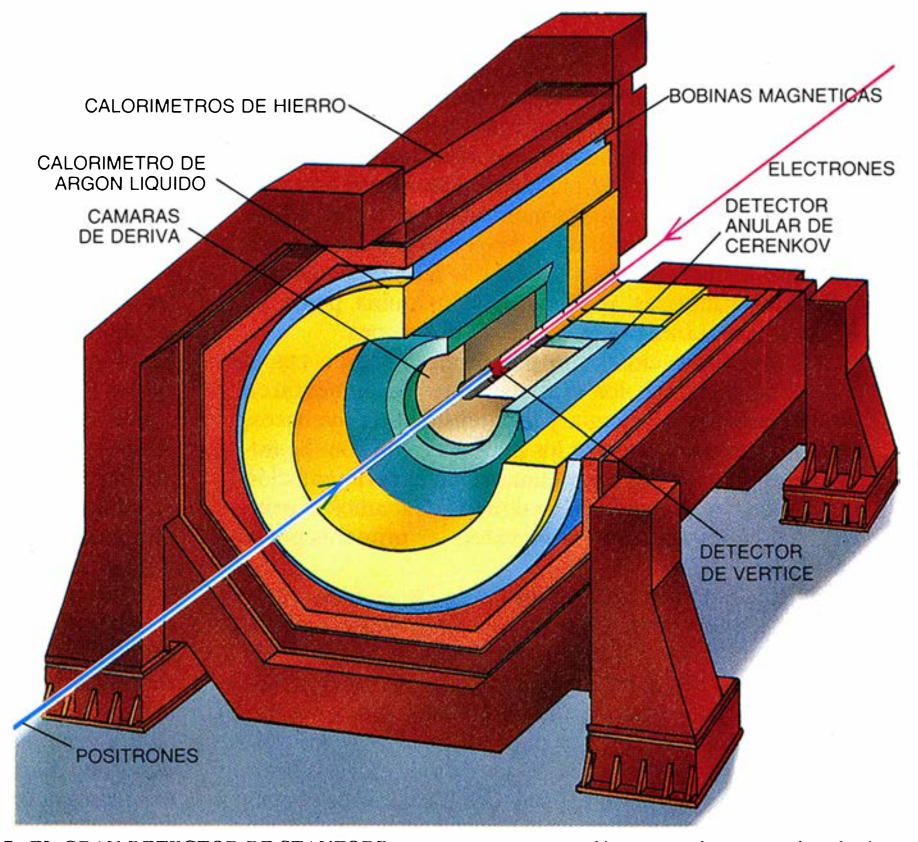
El tercer desafío fue mantener los haces comprimidos mientras avanzaban por el linac y se curvaban a través de los arcos. El entorno del linac tiende a romper los paquetes. Las partículas situadas al principio del paquete inducen campos electromagnéticos, llamados campos de estela, en las paredes del túnel de aceleración; a su vez, estos campos entorpecen la parte final del paquete, provocando su expansión lateral. Es como si el paquete destrozara su propia cola. Los campos de estela son especialmente destructivos si los paquetes no se encuentran exactamente en la línea central del tubo. Por no ser el tubo geométricamente perfecto, la única manera práctica de controlar el efecto del campo de estela consiste en aprender, por el método de prueba y error, a dirigir el haz de manera que el efecto sea el menor posible. La tarea encontró una complicación adicional: para ahorrar en el coste de la perforación de túneles, los arcos se construyeron adecuándose al terreno.

Por último, todas las partes del SLC debían funcionar con una estabilidad y precisión extraordinarias. Los ordenadores controlan miles de imanes y fuentes de alimentación, algunos de ellos con una precisión de una parte en 10.000. Mantener simultáneamente unas tolerancias tan altas para todos los componentes constituía un desafío formidable. Si no se podían encontrar modos de funcionamiento adecuados, los haces no colisionarían. Los haces tienen en el punto de colisión un diámetro parecido al de un hilo de una tela de araña. Deben estar bien dirigidos.

Todos los sistemas del colisionador estaban colocados hacia la primavera de 1987. En las primeras pruebas, el trabajo de formar los finos paquetes y de guiarlos hasta el punto de colisión fue costoso; lo que ya se esperaba, pues nunca se había intentado hasta entonces una navegación tan precisa de un haz de partículas a lo largo de un canal de transporte. Otras complicaciones en el funcionamiento del SLC se presentaron por sorpresa. El sistema de control por ordenador fue más difícil de domar de lo esperado. Y una fuerte ola de calor durante el verano de 1988 provocó problemas térmicos en los equipos que nos dejó tirados durante semanas.

Nuestro empeño por poner a punto el SLC continuó durante cerca de dos años; con mucha frecuencia, el millar de personas de SLAC trabajó por turnos todo el día. Finalmente, poco después de la salida del sol del día 11 de abril de este año, el gran detector Mark II detectó el primer Z^0. El intermediario quedó al descubierto al desintegrarse en un quark y un antiquark que se transformaron casi immediatamente en dos chorros de hadrones. Era la primera vez que los físicos veían comportarse un Z^0 a tenor de su conducta más probable: transformarse en hadrones.

Cuando el SLC empezó a producir Z^0, el colisionador LEP, que proporcionaba pocos desafíos técnicos nuevos, estaba a punto de terminarse. Las diferentes técnicas utilizadas en el SLC y en el LEP implican que las dos máquinas tendrán distintas posibilidades en el futuro. El LEP puede adaptarse a intensidades y energías mayores, que permitirán a los físicos investigar en reinos de mayores



7. EL GRAN DETECTOR DE STANFORD que se muestra en sección, en esta imagen, se instalará en el SLC en 1990. El detector de 4000 toneladas rodeará el punto de la colisión, lo que permitirá a los investigadores identificar todas las trazas de partículas. El detector de vértice determinará con gran precisión la posición de salida de cada traza. Otros detectores se disponen en capas alrededor del haz.

energías, a la búsqueda de partículas como el bosón de Higgs. El SLC, por otro lado, puede producir haces de partículas en los que todas tengan el mismo espín y puede permitir a los físicos experimentales obtener información más útil mediante ciertos experimentos. No obstante, aunque el SLC se construyó primero, la máquina del CERN promete ser, a la larga, la fuente más prolífica de Z^0. Por último, el gran interés del SLC residirá en haber sometido a prueba una nueva técnica de aceleradores, una técnica que muchos físicos piensan que es esencial, si los experimentos de física de partículas han de continuar hacia dominios de energías más altas que cualquiera de las alcanzables por los mayores y más costosos colisionadores de anillos de almacenamiento electrón-positrón hoy previsibles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PARTICLE STORAGE RINGS. Gerard K. O'Neill en *Scientific American*, vol. 215, n.º 5, págs. 107-116; noviembre de 1966.

EL BOSÓN DE HIGGS. Martinus J. G. Veltman en *Investigación y Ciencia*, n.º 124, págs. 52-59; enero de 1987.

INITIAL MEASUREMENTS OF THE Z BOSON RESONANCE. G. Abrams et al. en *Physical Review Letters*, vol. 63, n.º 7, págs. 724-727; 14 de agosto de 1989.

El colisionador europeo LEP

El día 15 de agosto de 1989, exactamente cuatro meses y cuatro días después de observarse la producción de la primera partícula Z^0 en el colisionador lineal de Stanford, en cada uno de los cuatro detectores del colisionador de electrones y positrones europeo LEP se observaba también el primer "ejemplar" de Z^0. El colisionador LEP se encuentra en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas del CERN, cerca de Ginebra, y consiste en un acelerador circular de unos 27 kilómetros de circunferencia en el que haces de electrones y positrones (antipartículas de los electrones, de igual masa pero de carga opuesta) son acelerados y, circulando en sentido opuesto, son obligados a colisionar en cuatro puntos concretos en los que se hallan situados los detectores.

La historia del LEP se remonta a diez años atrás, cuando empezó su planificación y diseño. La construcción del túnel subterráneo de 27 kilómetros que habría de alojar al acelerador comenzó hace apenas seis años. La instalación del acelerador y los detectores se ha realizado en tan sólo dos años.

La culminación de tan arduo y complejo proyecto tuvo lugar el pasado 14 de julio, día en que Francia celebraba el bicentenario de su revolución. A las 16,30 de ese día, el primer haz de positrones con una energía de 20.000 millones de electronvolt recorría por primera vez los 27 km del anillo del LEP. Inmediatamente entraron en funcionamiento diversos monitores, procediéndose a las primeras mediciones de la trayectoria del haz e iniciándose las correcciones de órbita. Resueltas algunas dificultades técnicas aparecidas, la máquina podía ya disponer regularmente de haces de positrones.

Los electrones circularon por primera vez en LEP el día 25 de julio. En los días siguientes se aumentaron paulatinamente la energía y la intensidad de los haces, y se concentraron éstos en los puntos de colisión. Se inició entonces un período preliminar de experimentación de tres días de duración. Como mencionábamos al principio, el 15 de agosto se observaron las primeras partículas Z^0.

En los cuatro puntos de colisión de LEP se hallan cuatro sofisticados detectores cuyos nombres son: ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL. En el diseño y construcción de cada uno de ellos han participado alrededor de un centenar de laboratorios pertenecientes a universidades y centros de investigación de diversos países. Tres laboratorios españoles participan en estas colaboraciones: el grupo de la CIEMAT de Madrid en L3, una colaboración de grupos de las universidades de Valencia y Santander en DELPHI y un grupo de la Universidad Autónoma de Barcelona en ALEPH.

Después del período preliminar de experimentación se realizaron diversos ajustes y se inició a continuación el primer período largo de experimentación que duró del 13 de septiembre al 9 de octubre. Dos días más tarde, el 11 de octubre, un físico de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) que participa en ALEPH me comunicaba que con este detector se había registrado ya la producción de 3400 partículas Z^0. La producción de partículas Z^0 es uno de los principales objetivos del LEP en su primera fase. Con ello se pretende estudiar las propiedades de esta partícula (descubierta en 1983) y, en especial, sus modos de desintegración. La información obtenida nos ayudará a confirmar con alto grado de precisión las teorías físicas vigentes o, en su caso, a diseñar o confirmar diferentes modificaciones de las mismas que los datos experimentales nos obliguen a introducir.

Llegados a este punto se hace inevitable la comparación de LEP con su, en cierto sentido, competidor americano: el colisionador lineal de Stanford o SLC. De forma simplificada, puede afirmarse que LEP es un acelerador "convencional", mientras que SLC puede considerarse pionero de los futuros colisionadores de electrones y positrones. De hecho, la mayoría de los físicos están de acuerdo en que LEP es casi con toda seguridad el mayor colisionador circular de electrones y positrones que jamás se construya. Un colisionador similar de mayores dimensiones sería mucho más costoso y apenas se conseguiría aumentar la energía de sus haces. Parece, pues, claro que el futuro está en los aceleradores lineales de electrones donde no existen las pérdidas de energía debidas a la denominada "radiación de sincrotrón". En este sentido SLC significa un importantísimo paso hacia los futuros aceleradores.

Por otro lado, debido precisamente a su mayor convencionalidad, los haces de electrones y positrones de LEP son de mucha mayor intensidad. En consecuencia, el número de colisiones es mucho mayor; así, LEP ha producido en tan sólo días un número de partículas Z^0 que SLC ha tardado meses en producir. Esta copiosa producción de partículas Z^0 permitirá una considerable reducción de los errores experimentales y obtener los resultados de alta precisión a que aludíamos anteriormente. En cualquier caso, los resultados que se obtengan de LEP y de SLC en los próximos meses serán impacientemente esperados por la comunidad científica y supondrán, con toda seguridad, un paso importante hacia el mayor conocimiento de la estructura y constituyentes de la materia. Este será sin duda un invierno excitante para la investigación básica y para la ciencia en general. (Antoni Méndez, profesor de la UAB.)

Sistemas de adquisición de datos de alta velocidad

La física de altas energías y sus grandes instrumentos han impulsado el desarrollo de sistemas electrónicos muy rápidos para controlar y adquirir datos de los experimentos. Acaba de entrar en funcionamiento el FASTBUS

A. Ferrer, E. Sanchis y A. Sebastià

La física de altas energías o física de partículas elementales ha conseguido progresos espectaculares en esta segunda mitad del siglo XX. Nuestro conocimiento sobre los constituyentes básicos de la materia (hadrones, formados a su vez por quarks, y leptones) y las fuerzas fundamentales que los ponen en relación (gravitatoria, débil, electromagnética y fuerte) ha progresado notablemente merced a la presentación de nuevas ideas unificadoras (el llamado modelo estándar y la teoría de la gran unificación). Nuevas ideas que han recibido parcial corroboración en descubrimientos experimentales de la mayor importancia, como el realizado en el detector *UA1* del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) y en el que se observaron los bosones intermediarios Z^0, W^+ y W^-.

Lo mismo que en muchas otras ramas de la ciencia, el progreso experimental en física depende o está ligado a los avances de la técnica, impulsados por los propios científicos ante la necesidad de explorar cada vez con mayor precisión, ayer, el interior de los núcleos y, hoy, el de las partículas constituyentes.

Para estudiar la materia, sus constituyentes y las fuerzas que actúan sobre ellos, los físicos de altas energías siguen el mismo camino que tomó Ernest Rutherford a principios de siglo: bombardear la materia con proyectiles nucleares y analizar las reacciones que se producen. Lord Rutherford, gran conocedor de los materiales radiactivos, propuso a dos de sus discípulos en Manchester, Hans Wilhelm Geiger y Ernest Marsden, la utilización de una fuente de radio, emisora de partículas alfa de unos 5 megaelectronvolt (MeV) de energía, que colocó cerca de una lámina delgada de oro. Estudiando con un sencillo microscopio los centelleos luminosos de las partículas alfa difundidas al atravesar la laminilla de oro, puso de manifiesto el núcleo atómico.

Desde la década de los cincuenta, se han sustituido las fuentes radiactivas por los aceleradores de partículas y el microscopio por complejos e imponentes espectrómetros electrónicos cuya misión es la de detectar todas las partículas que se producen en la reacción estudiada. Los espectrómetros constan de distintos tipos de detectores de partículas, capacitados para medir diversas propiedades físicas (masa, carga o energía, por ejemplo), con un rendimiento muy superior al que obtiene el ojo humano de su observación a través del objetivo de un microscopio.

Son muchos los parámetros que han evolucionado desde el modélico experimento de Rutherford. Ateniéndonos al ámbito de la física de altas energías, podemos distinguir tres grandes tipos de instrumentos que guardan una conexión directa con el experimento citado: los aceleradores de partículas, los detectores de partículas y los sistemas de adquisición de datos. Avances todos ellos que tienen en común el desarrollo de la electrónica y los ordenadores.

Antes de entrar en la descripción de los sistemas de adquisición de datos, conviene que el lector conozca algunos hechos recientes que tienen que ver con los aceleradores y los detectores de partículas. Los aceleradores de partículas, impulsados por el propio Rutherford en la década de los treinta, han experimentado una vertiginosa carrera en la que se ha conseguido un aumento de la energía de un orden de magnitud por cada década. (Es decir, cada diez años se ha multiplicado por diez la energía alcanzada.) Ello ha venido posibilitado por el desarrollo de técnicas de vacío, criogenia, superconductividad, campos eléctricos intensos y otros logros que han resultado en la construcción de gigantescos aceleradores de protones, de varios kilómetros de circunferencia.

Se han construido también anillos de colisión. Se trata de aceleradores circulares donde el electrón, el protón u otras partículas giran en un sentido y, a la vez y en sentido contrario, sus antipartículas correspondientes (positrón, antiprotón, etcétera). Maravilla de estos instrumentos el que, no obstante su imponente tamaño (el del colisionador de electrones-positrones –LEP– del CERN es un anillo de 27 kilómetros de circunferencia construido a unos 100 metros de profundidad) consigan que los dos haces de partículas enfrentados colisionen en un punto predeterminado de la trayectoria con una precisión del orden de un milímetro.

Ese aumento de la energía de las partículas proyectiles a que hemos aludido

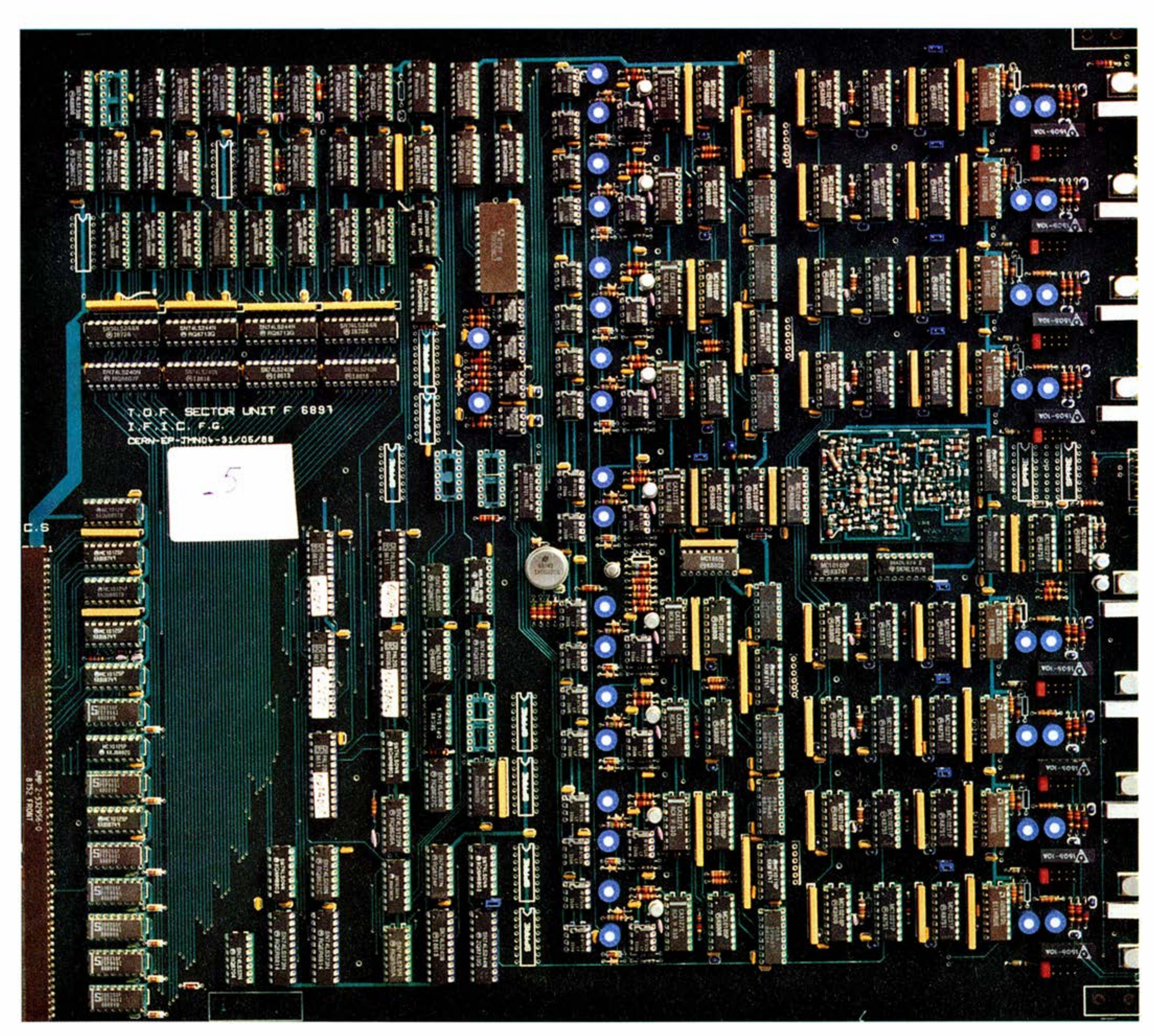
A. FERRER, E. SANCHIS y A. SEBASTIA se hallan adscritos al Instituto de Física Corpuscular de Valencia, que es un centro mixto de la Universidad de Valencia y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Ferrer se formó en la Universidad de Valencia. Se doctoró en física por las universidades de París Sud (Orsay) y Valencia. Trabajó en el Laboratorio del Acelerador Lineal de Orsay, Francia, y en el CERN, Suiza. Es catedrático de universidad y profesor de investigación del CSIC. Sanchis estudió y se doctoró en física en Valencia. Investigó en el CERN. Sebastià cursó la carrera de ingeniero industrial en la Universidad Politécnica de Valencia. Actualmente prepara su tesis doctoral en física. Sanchis y Sebastià son titulados superiores especializados del CSIC. El centro de interés de los tres es el Experimento DELPHI, que se está poniendo en marcha en el colisionador electrón-positrón (LEP) del CERN.

es el que da el límite del tamaño que se pretende explorar gracias a la llamada relación de Broglie, según la cual la longitud de onda asociada a la partícula en cuestión es igual a la constante de Planck ($\hbar$) dividida por el momento de la partícula (p). (Por momento de la partícula entiéndase $p = mv$, el producto de su masa por su velocidad.) Cuanto mayor sea la energía de la partícula que utilicemos como proyectil, menor será el objeto que podremos estudiar y más podremos ahondar en la constitución interna de la estructura de la materia.

Los detectores han evolucionado también. Y, aquí, rige asimismo la idea de que a mayor tamaño mayor cantidad de información ofrecida.La información de que hablamos consiste en una serie de pulsos electrónicos cuya función es doble: realizar selecciones rápidas de reacciones y medir cargas o tiempos mediante técnicas de digitalización numérica de pulsos.

Los datos de los detectores contienen una información muy variada: impactos en cámaras de hilos, número de contador atravesado por una partícula, carga depositada en procesos de ionización, tiempo de vuelo entre dos puntos, etcétera. Hoy en día no se puede concebir un gran acelerador sin un control del mismo por computador, ni podríamos controlar y adquirir los datos de los detectores sin ese recurso informático.

Estudiar una reacción entre partículas necesita, pues, el almacenamiento de una ingente cantidad de información obtenida electrónicamente. Para hacernos una idea de la cantidad de datos y del tiempo necesario para registrarlos, citaremos dos ejemplos característicos. En la década de los sesenta, una reacción entre partículas de un experimento prototípico aportaba una información que, en promedio, constaba de unos 2000 bytes por reacción. (Byte es la unidad de información equivalente a ocho bits.) Se podrían adquirir un centenar de reacciones cada diez segundos (la llamada repetición del acelerador),



1. MODULO FASTBUS digitalizador de tiempos para el proyecto TOF ("Time of Flight") del experimento DELPHI ("Detector for electron, lepton, photon and hadron identification"). La principal función de este módulo es la de medir diferencias de tiempos de señales eléctricas, con una precisión del orden de 0,5 nanosegundos. De esta forma se podrá medir en DELPHI el tiempo de vuelo de partículas cargadas eléctricamente y conocer con buena precisión el punto de impacto de éstas con el detector TOF. Este detector se ha diseñado y construido enteramente en España y posee 180 contadores de centelleo.



2. ACELERADOR SPS ("Super Proton Sincroton") del CERN. El tubo de vacío se encuentra alternativamente envuelto por imanes (*en color azul*), cuadrupolos (*en color rojo*), séxtuplos y otros elementos.

lo cual venía a producir aproximadamente una transferencia de 20.000 registros cada segundo de la electrónica al ordenador. En el anillo de colisiones electrón-positrón del CERN en el que los choques se producen a unos 90 gigaelectronvolt de energía (GeV) en el centro de masas (choque frontal), se obtienen unas 300.000 informaciones electrónicas por segundo. Con estos ejemplos hemos demostrado que el aumento de velocidad que hay que lograr para evitar la saturación en los sistemas de adquisición de datos es de un orden de magnitud.

Esas informaciones que se ponen de manifiesto en los detectores se almacenan transitoriamente en módulos electrónicos, conectados todos ellos a un ordenador central a modo de periféricos. A ese conjunto de módulos electrónicos y a su forma de conexión con el ordenador central es a lo que denominamos *sistema de adquisición de datos*, motivo de este artículo. Como el resto de los instrumentos, ha ido evolucionando para así satisfacer el aumento en la cantidad y rapidez necesaria para realizar un experimento en física de partículas. ¿Cuáles son los sistemas de adquisición de datos usados en física de altas energías y sus principales características?

En la definición de un sistema de adquisición de datos entran dos componentes: módulos electrónicos y el arbitraje con el ordenador. Los módulos electrónicos se hallan conectados a los detectores para convertir la información electrónica en valores digitales. Así, por ejemplo, los ADC (conversores analógicos digitales) convierten la información analógica proveniente de los detectores en valores digitales que pueden ser procesados por los ordenadores. Son importantes también los TDC (conversores de tiempo a digital), que convierten las medidas de intervalos de tiempo en valores digitales de una forma análoga a la anterior. En cuanto al arbitraje con el ordenador, éste se desarrolla a través de un interfaz que controla el funcionamiento de cada módulo electrónico. Uno y otro componente deben cumplir, como requisitos de operación, la modularidad, la flexibilidad de uso y la rapidez de respuesta, que hagan viable, útil y eficiente su conexión al ordenador. El primer sistema estándar de adquisición de datos controlado por ordenador, usado en física nuclear lo mismo que en física de partículas, es el CAMAC y, el FASTBUS, su sucesor actual en vías de implantación.

El sistema de adquisición de datos CAMAC fue introducido en 1969 por el Comité Europeo para Normalización y Certificación en Electrónica Nuclear (ESONE) y por el Comité Estadounidense de Instrumentación Nuclear (USNIM). La ventaja de partida del sistema CAMAC estribó en que lo aceptaron los fabricantes en sus catálogos de producción; así, además de la física de altas energías, otras áreas de la investigación y la industria lo adoptaron como sistema normalizado.

El sistema CAMAC se basa en un protocolo sencillo. Su ciclo es de un microsegundo, un millón de transferencias por segundo, y posee una estructura modular y flexible. Una operación CAMAC se realiza dando un conjunto de cinco parámetros, denominados *B*, *C*, *N*, *A*, *F*. Letras que remiten al siguien-

3. ACOPLADOR F685E. Se trata de un módulo FASTBUS, desarrollado en el laboratorio del CERN, que incluye todas las operaciones FASTBUS que se definen en la Norma, junto con una serie de registros habituales en el diseño de un módulo esclavo. Obsérvese el reducido espacio que el módulo ocupa.

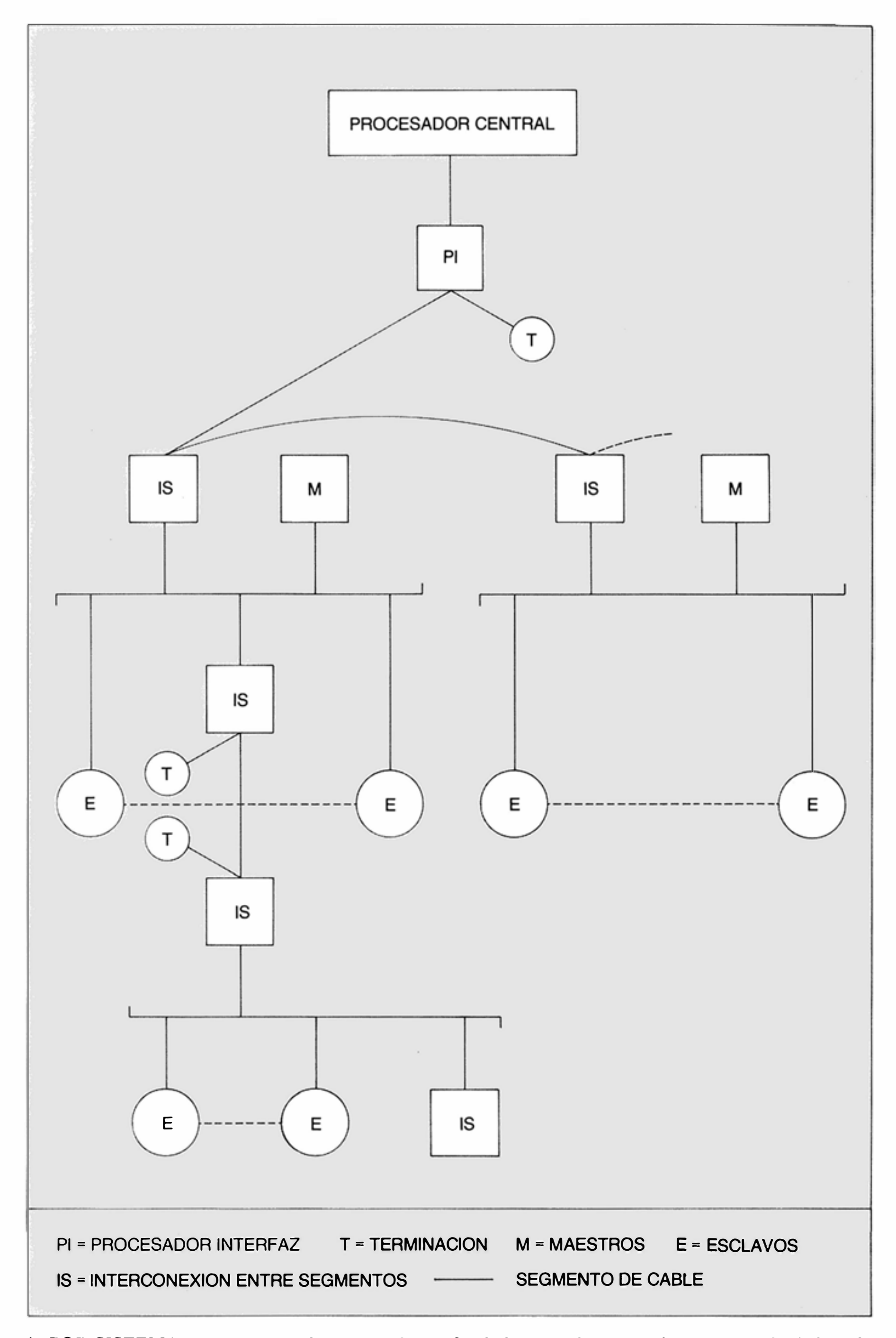
te significado: *B* es la rama, y puede tomar los valores de 0 a 2, lo cual indica que, desde el ordenador, se puede transferir información por tres ramas distintas. *C* es el chasis, y puede tomar los valores de 0 a 7, es decir, por cada una de las tres ramas anteriores se pueden conectar hasta ocho chasis distintos. *N* es la estación del chasis, donde se coloca un módulo. Hay 25 posiciones distintas. *A* es la dirección del registro de información dentro del módulo direccionado, y puede variar entre 0 y 15. Como se ve, los cuatro parámetros anteriores nos especifican la dirección de un registro dentro de todo un sistema. El parámetro *F* nos dice qué función hay que realizar con dicho registro: lectura, escritura, borrado, etcétera. Hay 32 funciones distintas posibles.

El *bus* de datos (tecnicismo que en informática designa el conjunto de líneas por donde se transfiere la información) tiene 24 bits de lectura y 24 de escritura. Se utiliza la lógica de transistor-transistor, TTL, que esencialmente consiste en una forma de creación de circuitos lógicos mediante transistores bipolares y resistencias.

Hasta los años setenta, CAMAC constituyó un sistema de adquisición de datos suficientemente potente para los experimentos que se llevaban a cabo. Con la llegada de grandes experimentos, los detectores que se utilizan han aumentado de tamaño y complejidad, lo que implica un mayor volumen de información a procesar en un reducido período de tiempo. Por otro lado, la necesidad de seleccionar sucesos válidos dentro de un alto ruido de fondo obliga a efectuar un procesamiento previo de los datos antes de su almacenamiento en los computadores, del que resulta la eliminación de los sucesos que *a priori* se sabe que no son de interés. En el argot se trata de la fase conocida por *disparador del experimento* ("trigger").

Desde este punto de vista, CAMAC resulta hoy ya un sistema ineficaz debido a su limitada velocidad de transmisión de datos. Por otro lado, el desarrollo de microprocesadores potentes, de 16 y 32 bits, hizo pensar en un sistema de adquisición moderno, basado en un protocolo de comunicación asíncrono en el que no sólo la velocidad de transmisión fuera importante, sino también la versatilidad de su uso, la flexibilidad de direccionamiento y el manejo de errores.

Con el fin de resolver las limitaciones de CAMAC, el comité US-NIM definió en 1977 lo que debiera ser un nuevo sistema de adquisición de datos acorde con las necesidades y técnicas de las nuevas generaciones de experimentos de física de partículas: el sistema FASTBUS (bus rápido). Tres años más tarde, el comité estadounidense para el estudio de sistemas de alta velocidad (FSSG), incardinado en el NIM, en colaboración con el comité europeo del grupo para el estudio de sistemas avanzados (ASSG), adscrito al ESONE, publicaron en el Instituto Norteamericano de Ingenieros de Electricidad y Electrónica (IEEE) un borrador donde se especificaban las características del nuevo sistema de adquisición de datos. En 1983 aparecían en los *Proceedings of the IEEE* las características definitivas del FASTBUS. La norma FASTBUS especifica, lo mismo que se hizo en CAMAC, los aspectos lógicos y electrónicos del bus, así como las características de los módulos (llamados familiarmente



4. POR SISTEMA FASTBUS entendemos aquel que, fundado en un bus ECL, tiene una topología basada en dispositivos maestros y esclavos. Los primeros poseen capacidad para tomar el control del bus a que están conectados y realizar operaciones de transferencias de datos (lectura y escritura) sobre los segundos. La conexión entre chasis se realiza mediante unos dispositivos denominados interconectadores de segmentos, SI (abreviado también SI, del inglés "Segment Interconect"). Un procesador interfaz establece finalmente la conexión entre el sistema FASTBUS y el procesador central de adquisición de datos.

maestros y esclavos) y chasis que se definen en la misma.

Las ventajas del nuevo sistema sobre el CAMAC, en lo que respecta al bus, que, recuérdese, consiste en un sistema modular en lógica TTL, con un protocolo síncrono de gran sencillez y un tiempo de ciclo de un microsegundo, conciernen a los puntos siguientes: campo de direcciones, direccionamiento, protocolo, estructura, sistema, autonomía, velocidad, transferencia y detección de errores.

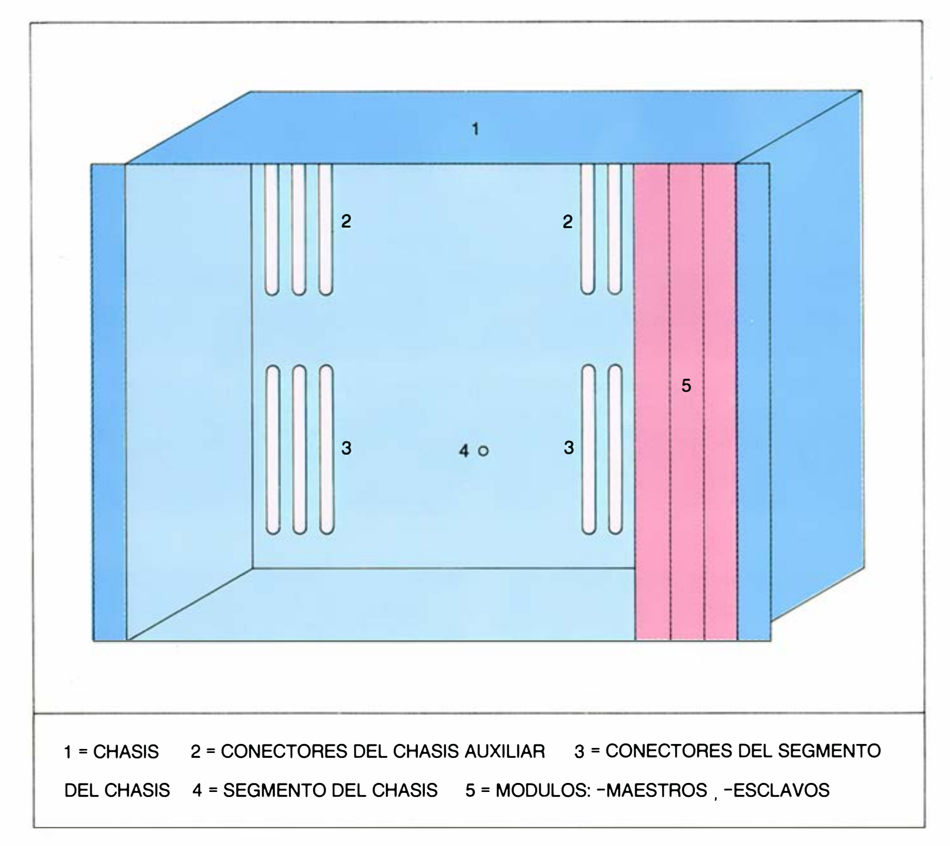
En el FASTBUS, el campo de direcciones y datos es de 32 bits, multiplexado, es decir, hay 32 líneas de bus compartidas, de manera que, cuando se realiza un ciclo de direccionamiento, éstas transportan una dirección y a continuación, cuando se realiza un ciclo de datos, las mismas líneas transportan un dato. FASTBUS posee un direccionamiento flexible; hay previstos, en efecto, diferentes tipos de direccionamiento, basado uno en la posición o direccionamiento geográfico, otro sin esa relación de dependencia o direccionamiento lógico y un tercero que permite el direccionamiento de varios módulos al mismo tiempo. Consta de un protocolo de comunicación único, el mismo tanto en los chasis como en los cables que los interconectan. Presenta una estructura reticular de los segmentos del bus, en que la comunicación es posible entre dos puntos cualesquiera del sistema. Desarrolla un sistema *multiesclavo*, neologismo que nos indica la posibilidad de que distintos maestros se alojen en un mismo chasis y compitan por la obtención del bus. Su autonomía admite un procesamiento paralelo en diferentes segmentos del bus. Alcanza una velocidad variable y muestra un elevado ancho de banda, algo que no ocurría en el CAMAC, cuya velocidad de transmisión era fija. En éste, en el FASTBUS, no existe, por contra, esa limitación merced al protocolo asíncrono que se establece entre maestros y esclavos. El FASTBUS realiza una transferencia en bloque en modo síncrono, es decir, en la transferencia de datos a largas distancias el protocolo asíncrono introduce retrasos considerables, en tanto que para transmisión a máxima velocidad un maestro puede transmitir datos a una frecuencia fija (modo síncrono). Por último, puede detectar errores; los módulos pueden indicar determinadas condiciones especiales o acciones inválidas en el proceso de transmisión.

Empecemos por detallar los componentes de que consta un sistema FASTBUS prototípico. Dos son los elementos principales: segmentos de bus y módulos que pueden actuar como maestros o esclavos. Un segmento de bus puede ser un bus eléctrico en un chasis, que cumple con las especificaciones mecánicas y eléctricas que se describen en la norma FASTBUS, o bien un cable que conecta dos chasis entre sí. La forma de establecer la comunicación es la misma en el chasis y en el cable. El procesador central, que suele ser, para un sistema complejo, un computador y, para sistemas más sencillos, un microprocesador, constituye el dispositivo por medio del cual se accede al sistema FASTBUS a través de un procesador de interfaz (PI). Se llama segmento de interconexión (SI) al módulo que conecta un chasis con un cable, con lo cual se posibilita la unión de varios chasis.

Los módulos pueden ser de tipo maestro, esclavo o ambos. La comunicación a través del bus se controla siempre por medio de un módulo maestro, quien se comunica con uno o varios esclavos en un momento dado. Es posible incluso que varios maestros residan en el mismo chasis. Si se hallan en diferentes chasis, podremos procesar los datos en paralelo; si en un mismo chasis, un protocolo de arbitraje permite la competición de diferentes maestros para hacerse con el control del segmento de bus correspondiente a dicho chasis.

Un maestro en un sistema FASTBUS puede establecer comunicación con un esclavo situado en cualquier punto del sistema a través de los módulos SI convenientemente programados para esta labor. Por otra parte, FASTBUS usa la tecnología de creación de circuitos lógicos más rápida que se conoce hasta el momento: la ECL (lógica acoplada por emisor), que permite una velocidad de transmisión de datos de hasta 150 megabytes por segundo, además de la comunicación entre módulos de un modo asíncrono a partir de un protocolo previamente definido. (Un megabyte equivale a un millón de palabras de ocho "bits", siendo un "bit" la unidad de información binaria que puede tomar los valores "0" o "1".)

El chasis del FASTBUS mide 19 pulgadas de ancho, unos 483 milímetros, y contiene 26 estaciones, donde pueden albergarse otros tantos módulos electrónicos. Cada módulo, que tiene 366,7 milímetros de altura por 400 milímetros de profundidad, está capacitado para alojar en su interior 300 circuitos integrados, siempre que la potencia disipada no exceda de 100 watt. Las 26 estaciones se numeran de 0 a 25 y de de-



5. CHASIS DEL FASTBUS. Consta del soporte mecánico y eléctrico necesario para albergar a las unidades funcionales (tarjetas maestro y esclavo) que se describen en la Norma FASTBUS. Cada chasis puede contener, a su vez, hasta veintiséis unidades distintas, aunque unidas entre sí a través del bus trasero.

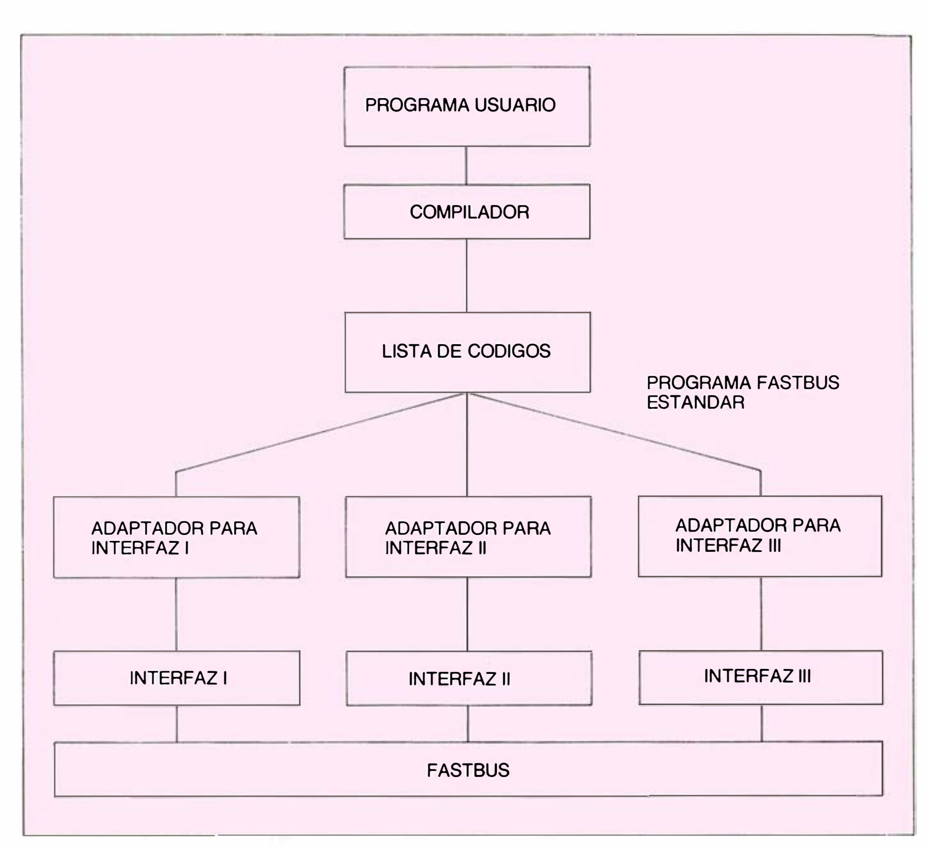
recha a izquierda. El bus consta de 130 líneas que se agrupan en direcciones de datos, control, temporización, alimentación y masas. Existe, además, un bus auxiliar que sirve para conectar segmentos de cables a los módulos SI o simplemente para ampliar el número de conexiones entre módulos si fuera preciso en casos excepcionales.

En la parte trasera de cada chasis hallamos conectada una lógica auxiliar, que maneja las operaciones de arbitraje de maestros en su pugna por el control del bus, el direccionamiento geográfico y el protocolo de comunicación durante ciclos de direccionamiento *multiesclavo*. Esa lógica auxiliar contiene, además, las terminaciones eléctricas del propio bus.

Los módulos pueden contener dos tipos de registros que se localizan en sendas regiones: zona de datos y zona de control (abreviada esta última por las siglas CSR). Podemos acceder a una o a otra por separado. A su vez, CSR se divide en cuatro regiones: función, programa, parámetro y aplicación. Cada una de estas regiones contiene información propia de ese módulo. Así, en la región función encontramos registros de identificación del módulo, direcciones lógicas, habilitación o deshabilitación y otras. En la región programa se reserva un espacio para memorias de acceso aleatoria (RAM) o de sólo lectura (ROM), que se utilizan para almacenar determinada información, verbigracia, el programa que deba ejecutarse en un módulo que contiene un microprocesador.

Lo dijimos antes, la conexión entre segmentos de bus se establece mediante segmentos de cable a través de los módulos SI. Hasta distancias de 100 metros, esa conexión permite la comunicación de un maestro con esclavos situados en cualquier punto de la configuración que se esté manejando. El segmento de cable es un cable plano adecuadamente terminado a la impedancia característica del mismo que conduce cada señal de bus de un segmento a otro. (La impedancia característica de un bus es la relación que existe entre la señal de tensión V, aplicada al bus, y la correspondiente de intensidad, I.) Para ello, cada módulo SI alberga amplificadores de corriente.

Las especificaciones que hemos dado del FASTBUS pertenecen al soporte físico del bus, es decir, a su chasis y módulos. Pero, lo mismo que ocurre en el CAMAC, lo importante es, sobre todo, el soporte lógico, la programación adecuada que se funda en un conjunto de rutinas fijadas que permiten el correcto funcionamiento del sistema en cuestión. Diez años después de la definición de CAMAC, se publicó el conjunto de subrutinas estándar que conforman el soporte lógico (*software*) de ese sistema. Siendo más complejo el FASTBUS, su programa es también bastante más extenso, y teniendo en cuenta por otro lado la gran variedad de interfaces para computadores desarrollados en Europa y los Estados Unidos, la definición de ese programa ha resultado muy laboriosa.



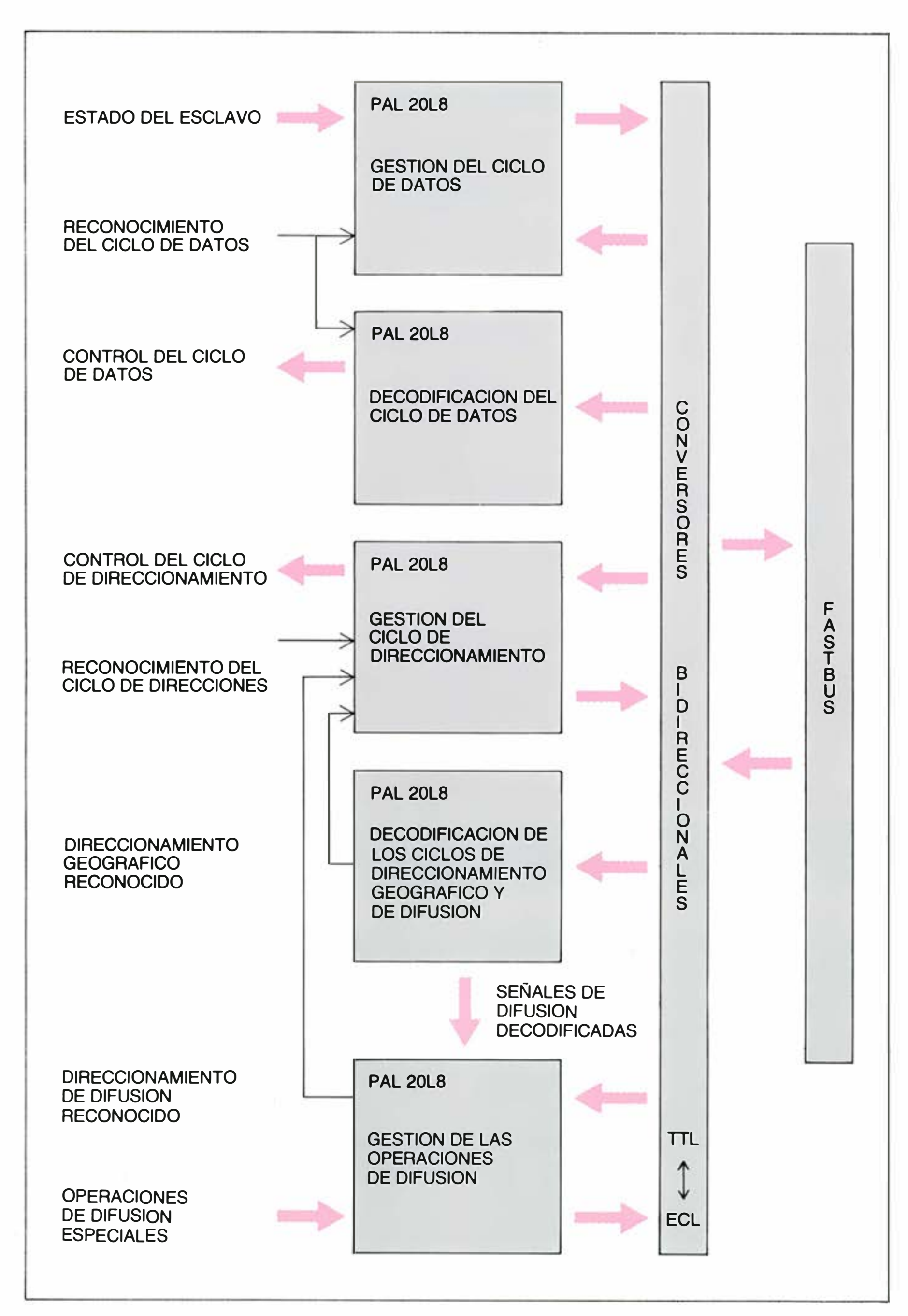
6. COMPILACION Y EJECUCION DE UN PROGRAMA EN FASTBUS. La compilación consta de la traducción del programa del usuario (llamado también programa fuente) a una lista de códigos interpretables por un interfaz adecuado expresamente construido para realizar la conexión a FASTBUS.

Vista, a grandes rasgos, la estructura lógica del FASTBUS, vale la pena detenerse en algunas rutinas, tal como se han desarrollado para que puedan ser manejadas por computadoras: VAX-11, PDP-11 y NORD, entre otras.

Las rutinas FASTBUS permiten la lectura y escritura en las regiones de datos y en la de control, y, ambas, en los modos de transferencia de palabras simples o bloques. Todas ellas se definen y operan en módulos maestro, programables, y en computadores centrales (*host*). El proceso de ejecución de una operación FASTBUS se inicia con un requerimiento de arbitraje por parte de los maestros que residen en el segmento de bus correspondiente. Se establece, luego, un ciclo de direccionamiento para conectar con el esclavo que se desee y, por último, admite todo tipo de ciclos de datos. La operación se completa liberando el control del bus por parte del maestro.

El formato típico de una llamada a una subrutina FASTBUS es la siguiente: FRD (siglas que corresponden a Fastbus Read), que abarca las órdenes sucesivas de "matriz de control" (CNTRL ARRAY), "matriz de estados (STATUS ARRAY), "dirección primaria" (PRIMARY ADDRESS), "dirección secundaria" (SECONDARY ADDRESS) e "información" (DATA). Los parámetros del programa son básicamente los mismos para todas las rutinas: la dirección primaria (geográfica, lógica o multiesclavo), la dirección secundaria y el dato (si se trata de una operación de escritura). En una matriz de control, se pueden definir opciones adicionales. La matriz de estados es necesaria cuando la subrutina en cuestión devuelve información; por ejemplo, puede contener el número de palabras transferidas o leídas en una operación de transferencia por bloques, así como otros valores correspondientes a errores en la transmisión o *time-outs* (fuera de tiempo).

La comunicación entre el procesador central y el sistema FASTBUS requiere el uso de un interfaz especializado. Ese dispositivo consiste en una serie de re-



7. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CIRCUITO ACOPLADOR para un módulo esclavo. Los circuitos PAL20L8 (matrices programables de 20 entradas y 8 salidas activadas en el estado lógico "0") se encargan de gestionar las operaciones básicas que se realizan sobre una tarjeta esclavo (aquella que no tiene capacidad para tomar el control del bus). Los conversores bidireccionales adaptan las entradas y salidas eléctricas del bus FASTBUS con las que se emplean en los circuitos programables PAL.

gistros de almacenamiento donde se codifica y decodifica oportunamente la información a transferir. La programación de cada uno de estos dispositivos difiere de la del resto. Por eso, existen, además de las rutinas de lectura y escritura mencionadas, otras auxiliares que sirven para definir el tipo y características de la interfaz que se use.

A grandes rasgos, la interpretación y ensamblaje de estas rutinas para producir los códigos máquina adecuados se dividen en las siguientes etapas y componentes: se parte de un programa usuario que pasa a un compilador y de éste a una lista de códigos. Se ramifica éste en tres direcciones, correspondientes a sendos adaptadores de interfaz: los llamados interfaz I, interfaz II e intefaz III. Los interfaces se hallan en conexión con el FASTBUS. Las misiones de cada etapa se resumen en tres puntos: *1*) traducción del programa del usuario (escrito en un lenguaje de alto nivel, tal como FORTRAN, PASCAL,...) en una lista de códigos, *2*) conversión de la lista de códigos (por medio del interfaz adecuado) en un conjunto de señales eléctricas correspondientes a una operación FASTBUS, y *3*) ejecución de la operación en cuestión por medio del bus FASTBUS.

Y así, el compilador ensambla las operaciones que se requieren para la ejecución de una subrutina que ha sido llamada por el usuario y las transforma en una lista de códigos que pasa al procesador. Este se encarga de ejecutar las operaciones FASTBUS, tal y como se ha definido en la lista de códigos.

El auge que está cobrando el sistema de adquisición de datos FASTBUS, sobre todo en aplicaciones donde la rapidez en la toma de decisiones constituye un factor crucial, ha exigido el diseño de un sistema de interfaz sencillo, a la vez que potente, que no requiera, del usuario del sistema, poseer un conocimiento profundo del soporte físico (*hardware*) subyacente.

Este sistema de interfaz, denominado acoplador del FASTBUS (o *coupler*), surgió como una necesidad de los ingenieros electrónicos responsables de los proyectos técnicos que se desarrollan en los experimentos de física de partículas. Tres eran las tareas habituales en ese dominio de la ciencia: desarrollo de módulos para medir la energía de las partículas que se producen en una reacción, la estimación de su tiempo de vuelo mediante conversores refinadísimos y la cuenta del número de veces en que acontecía determinado suceso; pues bien, con independencia de la tarea que tuvieran entre manos, los físicos se encontraban siempre con el mismo problema: la codificación y decodificación de las 130 señales de bus de FASTBUS resultaba excesivamente complicada, tediosa y, en la mayoría de los casos, el número de circuitos integrados (*chips*) necesarios demasiado elevado y costoso. Así las cosas, se decidió iniciar el desarrollo de los circuitos acopladores para FASTBUS.

En los laboratorios electrónicos del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN), éste ha sido uno de los proyectos que con más interés se ha llevado a cabo en los últimos años, algo obvio si tenemos en cuenta que la mayoría de los experimentos allí realizados emplean ese sistema de adquisición. La Unidad de Física Experimental de Altas Energías del Instituto de Física Corpuscular de Valencia (IFIC), en colaboración con el CERN, ha diseñado el sistema de interfaz para FASTBUS de empleo mayoritario en los experimentos de altas energías: el acoplador FASTBUS.

El diseño de los circuitos acopladores, como el nuestro, presenta un objetivo muy claro: conectar la lógica electrónica de un usuario de FASTBUS a un segmento de bus. Por parte de la lógica, piénsese en el desarrollo de un módulo maestro o esclavo que utilice lógica ECL (lógica acoplada por emisor) o TTL (lógica de transistor-transistor); por segmento de bus, entiéndase aquí el chasis o cable.

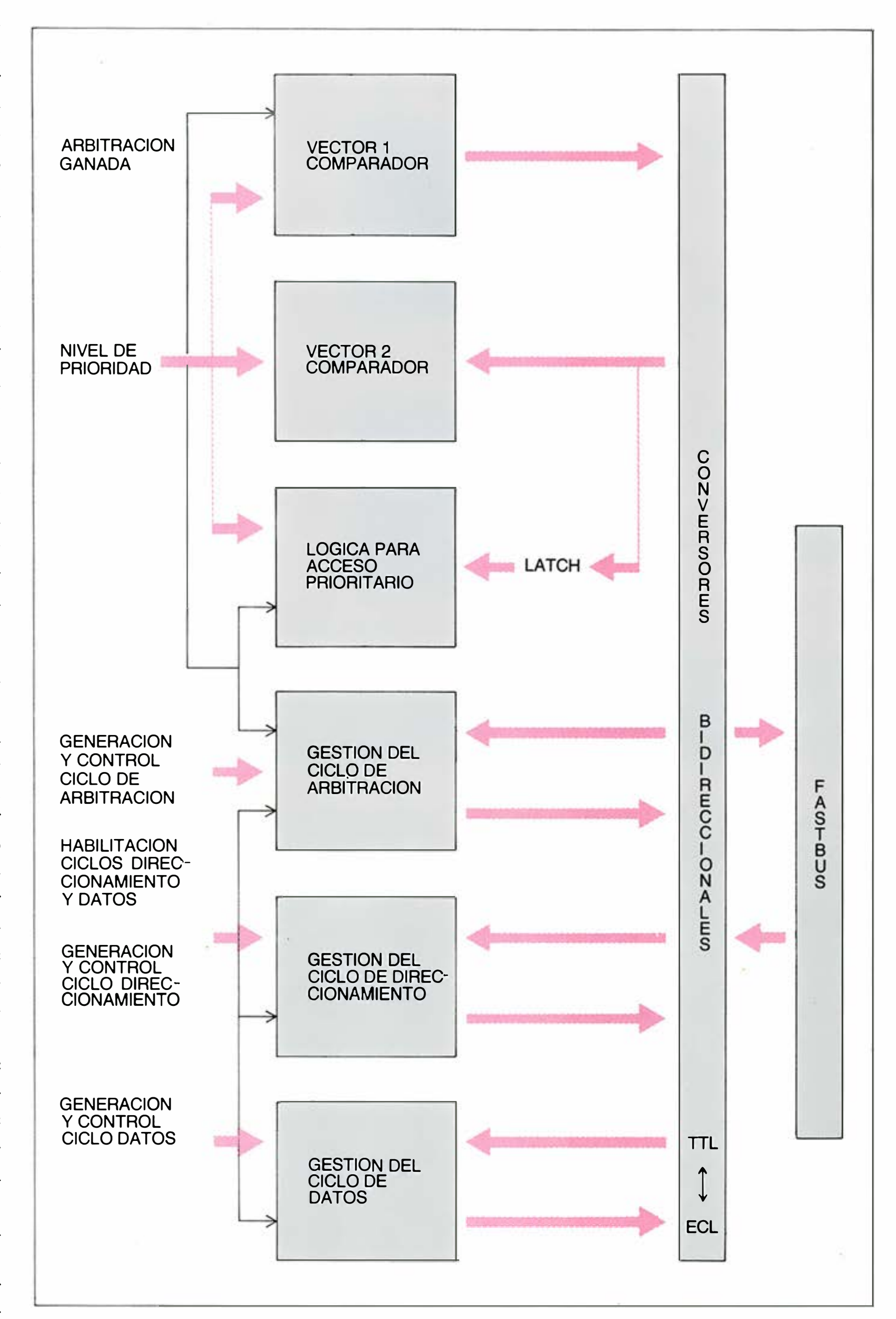
En 1984 apareció en el CERN la primera versión de un circuito acoplador basada en circuitos combinacionales rápidos, que se caracterizan por su alta densidad de integración y reducido tiempo de respuesta; ese prototipo codificaba y decodificaba todas las operaciones de ciclos de direccionamiento y de datos, salvo las operaciones *multiesclavo*. Hacia finales de ese mismo año, el CERN, en colaboración con la Universidad de Illinois, produjo el que se ha considerado primer diseño de un circuito acoplador para FASTBUS, en el sentido de que era capaz de gestionar absolutamente todas las operaciones que se definen en la norma establecida para dicho sistema. No obstante, la operación de ese circuito no resultó demasiado cómoda para los usuarios de FASTBUS, pues empleaba circuitos híbridos que complicaban el soporte físico y dificultaban la manipulación, amén de ser carísimo.

Un año más tarde, hacia noviembre de 1985, el afán por conseguir un prototipo estándar de interfaz encontró su cauce en la colaboración que venía manteniendo el departamento de electrónica del CERN y nuestro equipo del IFIC; logramos, por fin, crear el primer prototipo acoplador, que ha venido empleándose en los grandes experimentos de los últimos años; por citar algunos proyectos: DELPHI, OPAL, de reciente instalación en el colisionador de partículas LEP y que tienen como objetivo fundamental el estudio de la física del bosón Z^0.

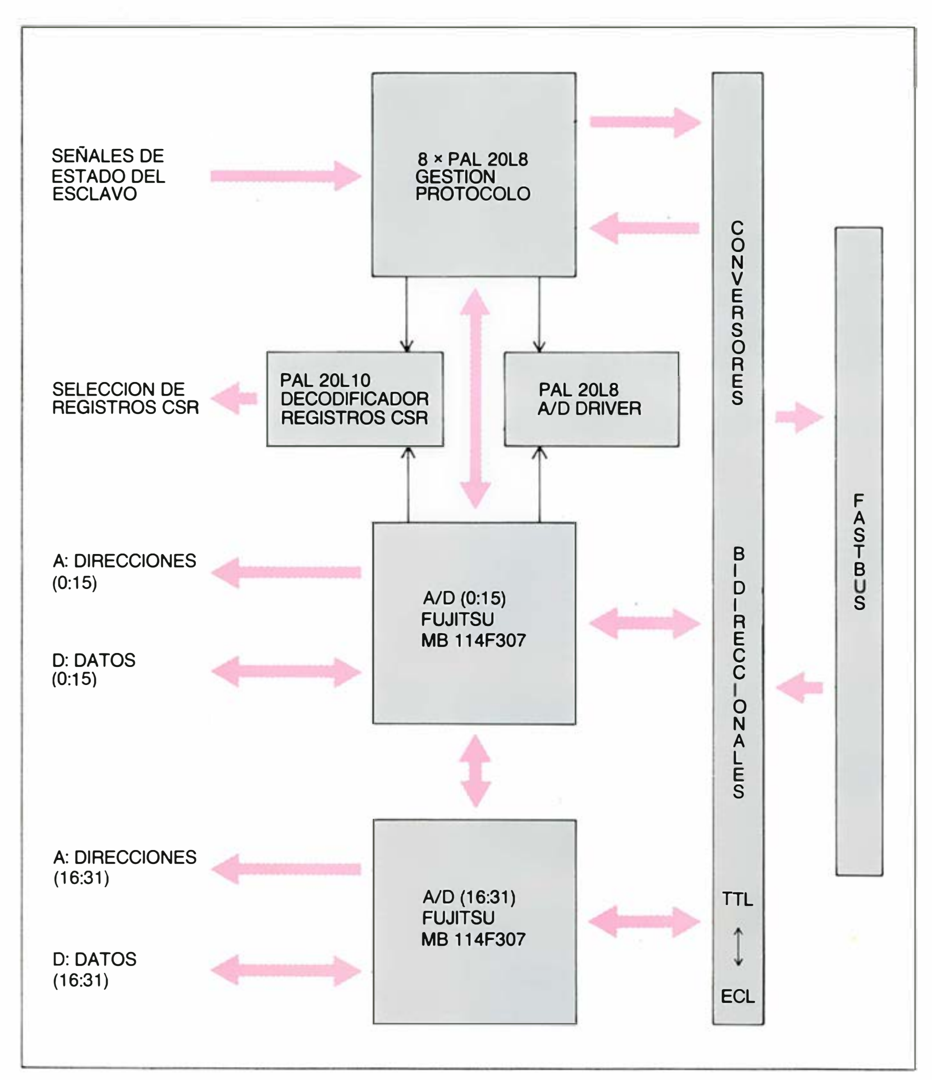
El diseño de nuestro acoplador se funda en el empleo de matrices programables (las PAL, siglas de "Programable Array Logic"), que simplifica notablemente la lógica electrónica y reduce la ocupación en un módulo FASTBUS. Aunque de forma sumaria, vale la pena exponer sus características principales. El diseño corresponde a la versión desarrollada en el CERN, por Guy Frèmont (CERN) y Enrique Sanchis (IFIC) en marzo de 1985, y utiliza matrices programables construidas en la versión TTL. El acoplador gestiona las operaciones relacionadas con un maestro y un esclavo. Por razones de claridad separaremos la presentación en dos partes: el interfaz con un esclavo y el interfaz con un maestro.

El interfaz con un esclavo consta de cinco matrices programables que se encargan de un doble reconocimiento de dirección, el geográfico y multiesclavo, así como de la gestión del protocolo necesario para realizar posteriores ciclos de datos. El interfaz con el esclavo permite la conexión de módulos electrónicos subordinados al bus FASTBUS. Dado que este tipo de unidades son las más frecuentes en los experimentos de física de partículas, la definición de un buen interfaz esclavo reviste la mayor importancia.

El interfaz con un maestro consta de seis matrices que se encargan de la lógica de arbitraje del procesador para acceder al bus. Se ocupa también de la generación de todas las señales de sin-



8. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CIRCUITO ACOPLADOR para un módulo maestro. El interfaz con una unidad maestro (o aquella dotada de capacidad para tomar el control del bus y decidir la operación FASTBUS a realizar) se lleva a cabo mediante el empleo de seis circuitos PAL; éstos se encargan de realizar la lógica de arbitraje del procesador (maestro) para acceder al control del bus, así como de la generación y adaptación de todas las señales de sincronización y validación que requieren FASTBUS.



9. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO ACOPLADOR ESCLAVO F685E. Las particularidades de este circuito son la incorporación de un conjunto de registros habituales en el diseño de módulos esclavo en dos circuitos integrados, del tipo conocido por "semi-custom". A diferencia del presentado en la figura, el interfaz F685E permite, además, la adecuación de los tiempos de respuesta de cada tarjeta esclavo, dependiendo de las particulares exigencias de diseño de cada aplicación que se considere.

cronización que un maestro necesita para su conexión al bus.

Este sistema acoplador se ha proyectado para usos generales, de suerte que cualquier interesado pueda emplearlo, en todo o en parte. El acoplador requiere una lógica auxiliar que el usuario debe construir, además de conversores del tipo de los empleados en ECL/TTL/ECL. Un circuito acoplador basado en las matrices PAL y técnica TTL, como el que acabamos de describir, logra la conexión a un ciclo de direccionamiento en un tiempo de 40 nanosegundos y, de 70 nanosegundos, en responder a un ciclo de datos. (Un nanosegundo es la milmillonésima parte de un segundo.) En la versión TTL, la realización del interfaz de un esclavo usa 9 conversores bidireccionales TTL/ECL HXA100255 y cuatro conversores ECL/TTL/MC10125, lo que le da una disipación de potencia de 8,3 watt; emplea también cinco matrices PAL 20L8, con una disipación de cuatro watt. Un acoplador de esa naturaleza viene a ocupar una superficie de un 20 por ciento de la de un módulo de FASTBUS.

En el CERN se ha desarrollado recientemente un acoplador esclavo que incluye las cinco PAL antes mencionadas y está dotado de toda la lógica auxiliar necesaria: el F685E. Este módulo incluye todas las operaciones FASTBUS que se definen en la Norma, junto con una serie de registros habituales en el diseño de un módulo esclavo. Estos registros, así como gran parte del protocolo, se construyen con dos circuitos integrados del tipo "semi-custom", que se han diseñado para esa función específica. Ello redunda en un notable ahorro de espacio y consumo. En su fabricación se emplea técnica TTL Shottky de bajo consumo; cada circuito de éstos maneja 16 de los 32 bits que constituyen el bus de dirección o datos en el sistema FASTBUS.

Podemos dividir el circuito en tres partes: el circuito encargado de gestionar el protocolo FASTBUS, que consta de las cinco matrices PAL, amén de otras encargadas de generar las señales de respuesta por parte del usuario; el circuito encargado de la gestión de las direcciones y los datos, que consta de los dos circuitos integrados "semi-custom" Fujitsu MB114F307; y el circuito encargado de la conversión de ECL en TTL, y a la inversa, que consta de 10 conversores bidireccionales F100255 y tres conversores ECL/TTL MC10125.

Dijimos más arriba que la mayoría de los grandes proyectos de aceleradores y colisionadores se aprovechan de las grandes ventajas del sistema de adquisición de datos del sistema FASTBUS. Nuestro grupo del IFIC, que participa en el experimento DELPHI, del CERN, en el anillo de electrones-positrones que ha empezado a funcionar en julio, ha montado dos detectores de partículas. Uno, llamado TOF, mide el tiempo de vuelo de las partículas que lo atraviesan con una resolución de un nanosegundo, enteramente diseñado y construido en España: se trata de un cilindro de tres metros de radio por siete de longitud, compuesto por 180 contadores de centelleo. El otro, llamado FEMC, mide la energía de los fotones y electrones de alta energía, con una resolución del 6 por ciento para electrones y fotones de 1 gigaelectronvolt. Este detector, construido en colaboración ítalo-española, se compone de 100 módulos de media tonelada de peso; cada módulo aloja 80 detectores de vidrio de plomo.

Para el dertector TOF se ha diseñado y construido un total de 50 módulos FASTBUS, amén de siete más, comerciales, que se incorporan para formar el esquema electrónico de adquisición de datos. Algo similar ocurre con el FEMC y con los otros 10 detectores que entran en el proyecto DELPHI.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CAMAC. UPDATED SPECIFICATIONS. Report N.º EUR 8500. ANSI/IEEE SH0842. Secretaría de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas. Luxemburgo, 1983.

IEE STANDARD FASTBUS MODULAR HIGH-SPEED DATA ACQUISITION AND CONTROL SYSTEM. Publicaciones del Institute of Electrical and Electronics, Inc., 1985.

FASTBUS: UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE MUY ALTA VELOCIDAD. Antonio Ferrer Soria, Enrique Sanchis Peris y Angel Sebastiá Cortés, en *Mundo Electrónico*, n.º 182, marzo de 1988.

ACOPLADOR PARA FASTBUS. Antonio Ferrer Soria, Enrique Sanchis Peris y Angel Sebastiá Cortés, en *Mundo Electrónico*, n.º 188, octubre de 1988.

Orígenes de las lenguas indoeuropeas

Casi todas las lenguas indoeuropeas pertenecen a la misma familia. El autor sostiene que se difundieron, no por medio de conquistas, como se había pensado, sino con la pacífica propagación de la agricultura

Colin Renfrew

Una de las cuestiones más debatidas en todo el ámbito de la arqueología y de la prehistoria es la de cómo explicar las notorias relaciones que vinculan entre sí a casi todas las lenguas europeas, muchas de las que se hablan en la India y en el Pakistán y algunas de los territorios intermedios. Hace ya más de dos siglos que se sabe que todos los idiomas indoeuropeos están emparentados. Pero, ¿qué proceso prehistórico subyace a este parentesco? ¿Cómo llegaron a hablarse en un área tan extensa lenguas afines? ¿Qué implicaciones tiene su distribución para la prehistoria y la historia europeas? (Téngase también presente que, a resultas de la expansión colonial que se produjo desde el s. XVI hasta el XIX, las lenguas indoeuropeas son habladas por más gentes que las de cualquier otro grupo de lenguas.)

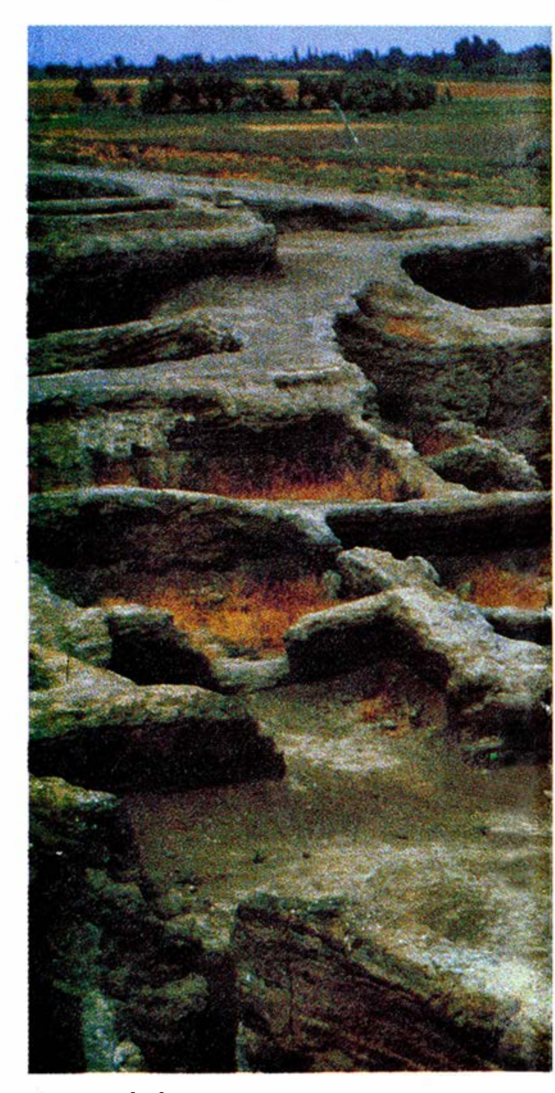
La opinión tradicional acerca de la difusión de las lenguas indoeuropeas sostiene que, hacia los comienzos de la edad del Bronce, las hordas de jinetes nómadas que habitaban al norte del mar Negro, en lo que hoy es la Rusia occidental, hablarían un idioma primitivo, antepasado de todos los restantes. A medida que aquellos guerreros fueran expandiéndose por más y más tierras en sus cabalgadas, irían sometiendo a las poblaciones indígenas e imponiéndoles su propio lenguaje proto-indoeuropeo, el cual, con el transcurso de los siglos, se transformaría en cada región en las lenguas indoeuropeas que actualmente conocemos.

COLIN RENFREW es profesor en la cátedra Disney de arqueología, de la Universidad de Cambridge, y director del Jesus College del mismo centro superior. Ha encabezado varias campañas de excavación en Grecia y en las Islas Británicas. Ha publicado, sobre el tema aquí desarrollado, *Archaeology and Language: The Puzzle of Indo-European Origins*, en la Cambridge University Press (1988).

Sin embargo, en los últimos años, muchos estudiosos, particularmente entre los arqueólogos, se han venido mostrando insatisfechos con la explicación tradicional. Por mi parte, he analizado los argumentos que la respaldan y no me parecen convincentes. En este artículo expongo una interpretación distinta, basada en nuevas concepciones acerca del modo de producirse los cambios culturales. Según esta nueva opinión, las lenguas indoeuropeas no necesitaron, para difundirse, ninguna conquista. Por el contrario, lo más probable es que fuese la suya una difusión pacífica, concomitante con la expansión de la agricultura desde sus focos originarios en Anatolia y en el próximo Oriente. Esta solución que proponemos, tan distinta de la comúnmente aceptada, tiene profundas implicaciones para la prehistoria europea y para los estudios de las lenguas indoeuropeas.

El problema de los orígenes del indoeuropeo no se empieza a plantear desde bases arqueológicas, sino desde un punto de vista lingüístico. Cuando los lingüistas examinan las lenguas europeas, no tardan en percatarse de que están relacionadas entre sí. Hay evidentes conexiones en el vocabulario, en la gramática y en la fonología (o reglas de pronunciación). Para ilustrar las afinidades léxicas basta comparar los vocablos con que se designan los números, del 1 al 10, en varias lenguas indoeuropeas [*véase la figura 3*]. Tal comparación pone en claro que existen notables semejanzas entre muchas lenguas de Europa y también con el sánscrito, el idioma de los primeros textos literarios de la India, mientras que lenguas como la china o la japonesa no pertenecen a la misma familia.

Comparaciones más detalladas permiten a los lingüistas subdividir ulteriormente, por familias, las lenguas europeas. La primera familia que se diferenció, la de los idiomas romances –formada por todos aquellos que se sabe que descienden del latín–, abarca el francés, el italiano, el español, el



1. ÇATAL HÜYÜK es el sitio de un primitivo poblado agrícola que se halla en la moderna Turquía,

portugués y el rumano. La familia de idiomas eslavos incluye el ruso, el polaco, el checo, el eslovaco, el servocroata y el búlgaro. En la familia germánica se numeran el alemán, el noruego, el danés y el sueco. Estas familias, que agrupan las lenguas más afines, pueden a su vez englobarse en la familia idiomática indoeuropea, más amplia. Sólo unos pocos idiomas europeos (por ejemplo, el húngaro, el finés y el vasco) quedan excluidos de esta familia.

¿Cómo se llegó a configurar y a establecer este complejo esquema? Tomando ante todo como modelo las lenguas romances. Aun a quien ignorase el latín, las profundas similaridades que se dan entre las lenguas romances no podrían menos de sugerirle naturalmente que todas esas lenguas descendían de un antepasado común. Suponiendo que las características que esas lenguas compartían las habían heredado de su mismo progenitor (mientras que las divergencias surgirían luego, en el proceso de su separación), habría sido posible reconstruir muchos de los rasgos característicos del proto-lenguaje originario. De manera similar, se vio que se podían estudiar las ramas de la familia indoeuropea y reconstruir un hipotético árbol genealógico que se remontaba hasta un ascendiente común: el idioma proto-indoeuropeo.

Este es el enfoque del árbol genealógico, cuyo propugnador fue, allá por los primeros años 1860, el filólogo alemán August Schleicher, enfoque que la mayoría de los lingüistas históricos consideran aún válido para explicar el desarrollo de las familias de lenguas. El proceso básico representado por el modelo dendriforme es de divergencia: al irse separando unas de otras, las lenguas se van diferenciando cada vez más, y los dialectos también se van diversificando hasta convertirse en idiomas distintos.

Ahora bien, la tendencia a divergir no es, ni mucho menos, la única posible en la evolución del lenguaje. Sólo un decenio después de que Schleicher propusiese su hipótesis del árbol, otro lingüista alemán, Johannes Schmidt, introdujo el modelo de la "ola", a tenor del cual los cambios lingüísticos se expandirían como oleadas, para acabar después convergiendo –esto es, produciendo semejanzas entre lenguas que inicialmente diferían por completo entre sí. En 1939 el lingüista soviético N. S. Trubetskoy llegó a sugerir que los parecidos entre las lenguas indoeuropeas podrían haberse ido formando de este modo. Actualmente, empero, la mayoría de los lingüistas rechaza la sugerencia de Trubetskoy y piensa preferentemente en términos de árboles genealógicos de las lenguas.

Aunque el punto de partida del problema de los orígenes indoeuropeos pueda ser lingüístico, su solución depende sin duda de la arqueología, que ofrece el medio de comprobar las hipótesis lingüísticas. Los arqueólogos empezaron a ocuparse de esta cuestión a comienzos de nuestro siglo. Por entonces se conocía cada vez mejor la arqueología de romanos, griegos y celtas



en el centro de la altiplanicie de Anatolia. La agricultura se originó aquí y en otros lugares cercanos allá por el año 7000 a.J.C.; no mucho después empezó a difundirse hacia el norte, por Europa. El autor sostiene que la forma prototípica del lenguaje indoeuropeo se difundió junto con la agricultura.

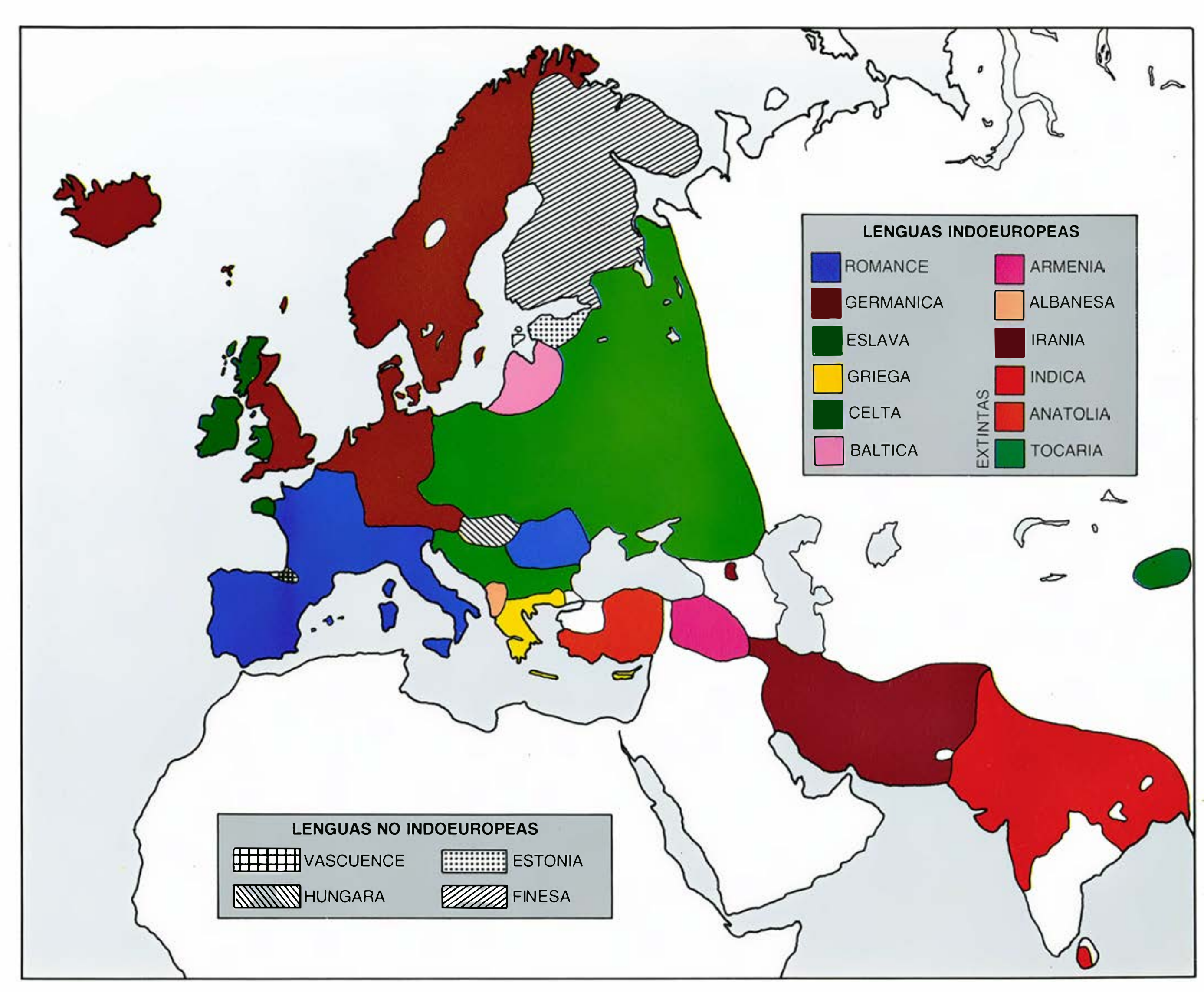
hasta frisar en los inicios del período histórico, más o menos alrededor del primer milenio a.J.C. Por otra parte, los hallazgos arqueológicos parecían muy prometedores para profundizar en el conocimiento de la prehistoria, permitiendo remontarse ya hasta el Paleolítico (la edad de Piedra más antigua) en la mayoría de las regiones de Europa. Se empezó a considerar la posibilidad de que, a partir de esos nuevos datos, lograran rastrearse los orígenes de las culturas de los pueblos que hablan las lenguas europeas.

En aquella temprana época de la arqueología se daba por supuesto que los cambios culturales de mayor importancia se producían a resultas de las migraciones de pueblos o de tribus enteras. Y se creía que las rutas migratorias podían seguirse examinando las características de las armas, los utensilios y los restos cerámicos que los emigrantes habían ido dejando por el camino. También se suponía que un determinado conjunto de artefactos –lo que los arqueólogos llaman una "cultura"– podía servir para documentar la antigua presencia de determinada tribu de un pueblo con su lenguaje propio. De esta manera, los movimientos de las tribus, a medida que eran rastreados y registrados por los arqueólogos, vendrían a explicar la dispersión de las lenguas indoeuropeas más arcaicas. La cuestión se reducía, entonces, a encontrar el "terruño" originario de los indoeuropeos e ir siguiendo sus dispersiones desde él, guiándose por los restos arqueológicos de sus culturas.

Pero a la hora de buscar aquel terruño patrio surgieron las controversias, y la discusión al respecto no siempre ha sido puramente académica. La mayoría de los especialistas alemanes de nuestro siglo se han inclinado a situar la cuna del indoeuropeo en el norte de Europa. Los nazis aprovecharon algunos de sus trabajos en su esfuerzo por demostrar que el lenguaje indoeuropeo originario había sido hablado en Alemania por la dominadora raza "aria".

Al mismo tiempo, los nazis asociaron las lenguas semíticas, que forman un grupo diferente, a una raza que ellos consideraban inferior. De tan abusivo falseamiento de la lingüística y de la antropología provenían en parte los sórdidos fundamentos ideológicos del Tercer Reich. No es de extrañar que, en los últimos años, los investigadores anduvieran con pies de plomo cuando se aventuraban por este campo de los orígenes de las lenguas, si es que se introducían siquiera por él.

Sin embargo, la idea de un hogar patrio del indoeuropeo no fue la que más influyó en los círculos especializados. En 1926, V. Gordon Childe, del Real Instituto Antropológico de Londres, publicó *The Aryans* [*Los arios*], libro en el que abogaba por una patria ancestral que habría existido en las estepas que se extienden al norte del mar



2. DISTRIBUCION DE LAS LENGUAS INDOEUROPEAS desde Islandia hasta la India. Casi todos los idiomas europeos forman parte de esta familia. **Entre las excepciones se hallan el finés y el húngaro, pertenecientes al grupo ugrofinés, y el vasco, que persiste todavía en un espléndido aislamiento.**

Negro, en la actual Rusia, allá por los finales del período Neolítico y los comienzos de la edad del Bronce, época bien fijada ya en algunas partes de Europa hacia el año 3000 a.J.C.

El texto de Childe contenía argumentos arqueológicos y lingüísticos; estos últimos eran particularmente ingeniosos. Se inspiraban en el éxito con que los lingüistas habían logrado establecer un "núcleo" de vocabulario esencial que les era común a muchas lenguas indoeuropeas. Inferíase que ese núcleo había perdurado como una reliquia viva del lenguaje protoeuropeo que se habló en la primitiva patria. Palabras "nucleares" de plantas y animales se empleaban para obtener una representación del ambiente en el que vivieron los arcaicos hablantes de aquel idioma. Otras palabras proporcionaban un medio para datar la formación de tal protolenguaje. No había ninguna palabra nuclear para designar el hierro o el bronce, pero sí para el caballo y para la rueda. Por tanto, parecía que la dispersión de los indoeuropeos debió de iniciarse antes del comienzo de la edad del Bronce, pero con posterioridad a la domesticación del caballo y a la invención de los carros.

Childe pasaba luego a conectar estas ideas lingüísticas con los datos arqueológicos. Centraba especialmente la atención en las vasijas cordadas (un tipo de cerámica que se decoró mediante la impresión, con cuerdas, de la arcilla aún blanda), abundantes en sitios datados como de comienzos de la edad del Bronce. En la Europa del norte y del este abunda este tipo de cerámica –junto con hachas de combate de piedra– en unos túmulos terrosos, denominados "kurgans" en ruso, que servían de tumbas para los notables. Childe proponía que estos artefactos eran los restos materiales dejados por grupos de pastores nómadas que, armados y a caballo, emigraron desde su esteparia tierra natal, situada al norte del mar Negro, al principio de la edad del Bronce. Fueron ellos, en suma, los indoeuropeos.

En los últimos años este argumento lo ha desarrollado con especial detalle Marija Gimbutas, de la Universidad de California en Los Angeles. Utilizando los datos y las descripciones a que recurriera Childe y reforzándolos con datos más recientes, Gimbutas ha reconstruido una serie de "invasiones kurganas" que habrían afluido hacia occidente desde los territorios al norte del mar Negro. Esta teoría ha encontrado amplia aceptación entre los lingüistas históricos. También han llegado a aceptarla muchos arqueólogos, y otros argumentos arqueológicos suelen ahora retocarse para que se ajusten a la hipótesis de la invasión kurgana. Pero, a mi entender, semejante historia no es convincente.

INGLES	GERMANICO ANTIGUO	LATIN	GRIEGO	SANSCRITO	JAPONES
ONE	AINS	UNUS	HEIS	EKAS	HIITOTSU
TWO	TWAI	DUO	DUO	DVA	FUTATSU
THREE	THRIJA	TRES	TREIS	TRYAS	MITTSU
FOUR	FIDWOR	QUATTUOR	TETTARES	CATVARAS	YOTTSU
FIVE	FIMF	QUINQUE	PENTE	PANCA	ITSUTSU
SIX	SAIHS	SEX	HEKS	SAT	MUTTSU
SEVEN	SIBUM	SEPTEM	HEPTA	SAPTA	NANATSU
EIGHT	AHTAU	OCTO	OKTO	ASTA	YATTSU
NINE	NIUN	NOVEM	ENNEA	NAVA	KOKONOTSU
TEN	TAIHUM	DECEM	DEKA	DASA	TO

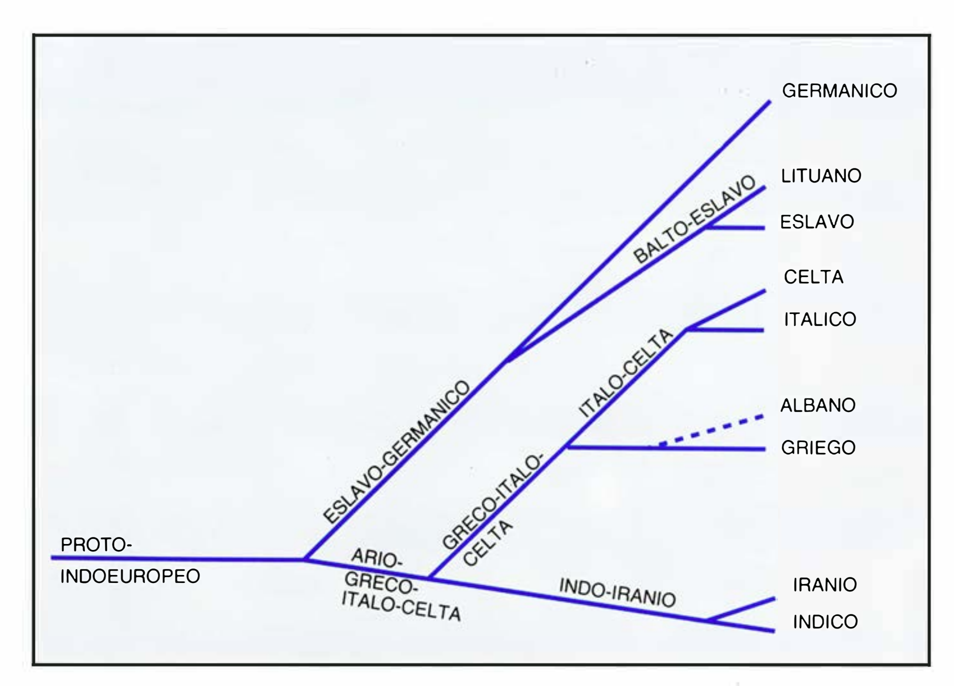
3. VOCABLOS PARA DESIGNAR los números del 1 al 10. Evidencian las relaciones que hay entre las lenguas indoeuropeas y el carácter muy diferente del idioma japonés, que no forma parte de esta familia. Tales afinidades y semejanzas estimularon el interés por los orígenes de las lenguas indoeuropeas.

Mi razonamiento es bastante complejo. En primer lugar, la arqueología no es aquí concluyente: muchos arqueólogos consideran hoy los enterramientos con cerámica cordada como fenómenos esencialmente locales, en los que se sepultaban, junto a los miembros de las emergentes aristocracias locales, bienes valiosos. Y tampoco es un argumento sólido el de las palabras nucleares. Algunas de las llamadas así y con las que se designan plantas y animales podrían muy bien haber cambiado de significación con el transcurso del tiempo; en cualquier caso, no son necesariamente específicas de una determinada área geográfica. Y las palabras que dan pie para las dataciones son igualmente sospechosas. Robert Coleman, de la Universidad de Cambridge, ha cuestionado la idea de que las palabras para nombrar la rueda y el caballo formasen realmente parte de un "protoléxico" anterior a una dispersión general.

Quizá la principal objeción sea simplemente la falta de convicción que deja tras de sí todo el argumento. ¿Por qué razón hubieron de emigrar unas hordas de jinetes guerreros hacia occidente a finales del Neolítico, subyugando a los habitantes de Europa e imponiéndoles el lenguaje proto-indoeuropeo? ¿Qué desmesurado aumento de población en las estepas podría haber provocado semejante invasión? Esa hipótesis, aunque de construcción elegante, no me resulta creíble.

El problema esencial es, a mi parecer, que no se ha atendido lo bastante a la cuestión de cómo pueda en realidad reflejarse un cambio de lenguas en los restos arqueológicos. Muchos de los argumentos tradicionales, como los arriba mentados, tienden a equiparar un determinado conjunto de útiles con la existencia de un grupo supuestamente bien definido; por ejemplo, una tribu. Sin embargo, los arqueólogos están cayendo ahora en la cuenta de que son ellos los que reconocen y definen las "culturas" arqueológicas y de que la equivalencia entre éstas y unas supuestas tribus es problemática. Más aún, la ulterior igualación entre un pueblo así definido y un determinado lenguaje o grupo lingüístico dista muchísimo de ser algo que se pueda proponer como evidente.

En mi opinión, debería evitarse el equiparar un determinado estilo de cerámica, tal como el de las vasijas cordadas, con la existencia de un pueblo o de un lenguaje particular. El análisis debería centrarse en procesos de cambios culturales. Habría que plantearse qué procesos demográficos, económicos y sociales podrían correlacionarse con los cambios lingüísticos. Una vez resuelta esta cuestión, será entonces legítimo preguntarse cómo se reflejan estos cambios en los restos arqueológicos. Pero antes de pasar al examen de los restos es preciso construir algu-



4. MODELO DENDRIFORME que representa los orígenes de las lenguas indoeuropeas como ramas divergentes a partir de una raíz común: el lenguaje proto-indoeuropeo. Este esquema fue ideado en los inicios de la década de los sesenta del siglo pasado por August Schleicher, promotor de tal enfoque.

nos modelos explícitos de interpretación del proceso de cambio del lenguaje de acuerdo con una concepción básicamente procesual.

Hay cuatro clases principales de modelos, que el espacio de que aquí dispongo sólo me permite tratar muy brevemente. El primer modelo es el del proceso de colonización inicial, por el que un territorio deshabitado se puebla; su idioma será, naturalmente, el de los colonizadores. El segundo modelo es el de los procesos de divergencia, tales como la divergencia lingüística que se deriva de la separación o del aislamiento de que hablé al referirme a los primeros modelos de lenguas indoeuropeas. El tercer grupo de modelos se basa en los procesos de convergencia lingüística. El modelo de la "ola", formulado por Schmidt en la década de los setenta del siglo pasado, es un ejemplo; pero, como ya señalé, los modelos de convergencia no han encontrado aceptación, generalmente, entre los lingüistas.

Ahora bien, además de estos procesos lentos y casi estáticos interviene otro factor: la sustitución lingüística. Este factor proporciona la base para otro cuarto tipo de modelos. En muchas zonas del mundo, las lenguas que hablaban las poblaciones indígenas se han ido sustituyendo, en todo o en parte, por las que hablan los nuevos pobladores llegados de otras zonas. De no ser por este importante factor de complicación, la historia lingüística mundial podría describirse fielmente conforme a la inicial distribución del *Homo sapiens sapiens*, seguida de graduales procesos a largo plazo de divergencia y de convergencia.

A mi entender, la sustitución lingüística desempeña un papel clave en la explicación de los orígenes de las lenguas indoeuropeas. Los hallazgos arqueológicos indican que Europa ha estado siempre poblada, desde la misma edad de la Piedra arcaica. Por tanto, no es probable que la hipótesis de la colonización inicial tenga mucho de certera. En cuanto a la de la simple divergencia, parece improbable que pueda explicar la intrincada trama de relaciones que se observa entre las lenguas europeas. La hipótesis de que la unidad era el resultado de un proceso de convergencia, esbozada por Trubetskoy, ha sido ampliamente rechazada. Parece, pues, que se impone necesariamente, casi por exclusión, un modelo basado en el reemplazo lingüístico. El modelo "invasión kurgana" entra también dentro de esta categoría; mas, como ya dijimos, no acaba de ser convincente. ¿Qué alternativas quedan?

Una lengua podría reemplazar a otra, en una determinada región, de varios modos distintos. El primero incluye ante todo procesos demográficos y económicos. La población que habita en una región suele tener generalmente una economía de subsistencia bien establecida. Tanto si está basada en la caza y la recolección eventual, como si cuenta ya con asentamientos agrícolas, tal economía habrá empezado a aproximarse a un adecuado "nivel de sostenimiento". Si un grupo de recién llegados trata de establecerse en dicha región por medios pacíficos, deberá poseer unas técnicas que le capaciten para explotar un nicho ecológico diferente o para competir con éxito en el ya ocupado. Sólo en estos casos logrará la población advenediza expandirse lo bastante como para que su lengua empiece a predominar.

También son posibles otras formas de sustitución. Cuando el grupo inmigrante está bien organizado y en posesión de superiores técnicas militares, puede imponerse al sistema social existente y dominar por la fuerza de las armas. En tales casos, la nueva élite dominante puede imponer su propio idioma. Pero ese dominio por una élite requiere que se cumplan varias condiciones previas. Una es la posesión de una tecnología militar superior. Otra, que los dos órdenes sociales –el de los indígenas y el de los ocupantes– tengan un alto grado de organización. El grupo llegado habrá de estar organizado para ejercer el dominio; la sociedad indígena habrá de estar muy organizada si, ya sometida, ha de perdurar.

Las invasiones kurganas serían un buen ejemplo del modelo de dominio por una élite si se pudiese probar que cumplieron esos requisitos. Mas esto no es probable. La presunta superioridad militar de los guerreros kurganos (el hecho de que fuesen jinetes) pertenece al ámbito de la suposición, pues no está nada claro que por aquella época existiese la caballería como arma. Por otra parte, todavía está por demostrar que los presuntos invasores o los habitantes de Europa hubiesen adquirido un alto grado de organización antes del comienzo de la edad del Bronce y hubieran experimentado semejante proceso. Lo probable es, más bien, que sólo con la edad del Bronce se produjera aquella pronunciada estratificación social; en el precedente período, el del Neolítico, es probable que las sociedades fuesen bastante igualitarias.

Mencionaré, al menos de pasada, otras dos formas de reemplazamiento. Cuando una sociedad muy centralizada se viene abajo, los pueblos vecinos a los que hasta entonces había mantenido a raya en sus fronteras, sujetos a control, se aprovechan de la ventaja que les reporta el vacío de poder central e invaden el territorio, como lo hicieron los "bárbaros" a la caída del Imperio romano. En los casos de hundimiento de un sistema así, la lengua de los "bárbaros" invasores puede llegar a suplantar a la del centro imperial.

En cambio, cuando en una sociedad igualitaria se trafica a largas distancias, es frecuente que se desarrolle un len-

guaje comercial, una "lengua franca". El habla macarrónica (versión simplificada de un lenguaje originada por quienes lo hablaban fuera del territorio del mismo) constituye un buen ejemplo. Cuando la lengua franca empieza a emplearse como lengua materna por algunos nativos, se convierte en idioma criollo; y a la criollización, que no es sino un tipo de sustitución, se la considera en la actualidad un aspecto importante del desarrollo lingüístico.

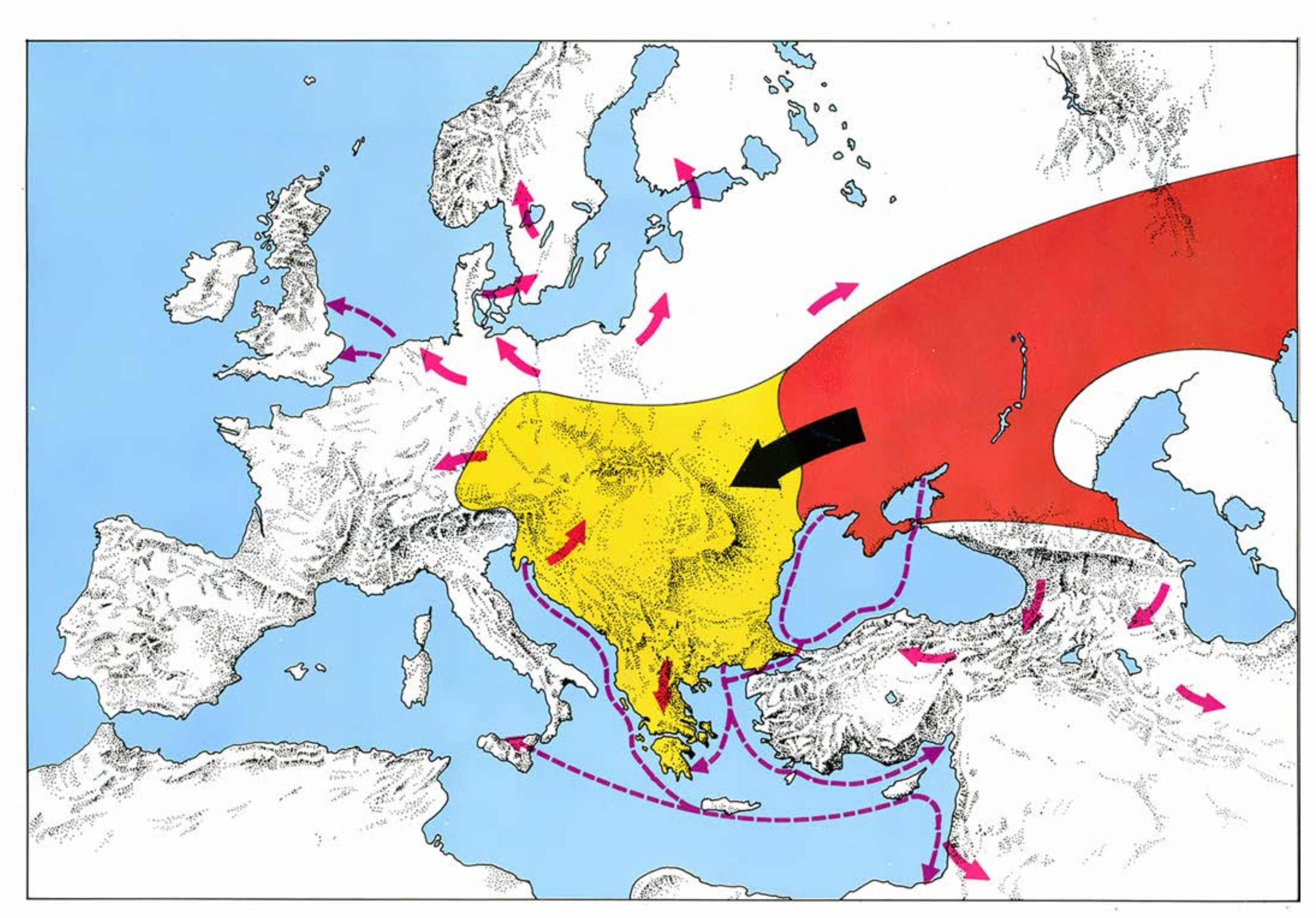
Si aplicamos estas formas del reemplazamiento lingüístico –cambio demográfico, dominio de una élite, hundimiento del sistema y lengua franca– a la historia y a la prehistoria europeas, nos habremos acercado mucho a nuestra meta. El dominio elitista y la ruina del sistema requieren ambos un grado de organización social que probablemente faltaba antes de la edad del Bronce. Tampoco es probable que antes de esta época hubiese en Europa algún sistema comercial lo bastante intenso como para favorecer el desarrollo de una lengua franca. Esto nos deja con sólo los modelos demográfico y de subsistencia. En una visión panorámica de la prehistoria europea se destaca un evento de tan universal alcance y de efectos tan radicales que se nos impone como el candidato ideal, episodio que encaja perfectamente en la categoría de la subsistencia: el desarrollo de la agricultura.

En el séptimo milenio a.J.C. empezó a difundirse por Europa una nueva economía, agrícola, basada en el cultivo del trigo y de la cebada y en el pastoreo de ovejas y cabras. Estas especies, que no medraban en Europa, fueron importadas. Si se estudia su ascendencia por Europa hasta llegar a la región más cercana donde sus prototipos se desarrollaban en estado silvestre, llegamos a la Anatolia central, que hoy forma parte de Turquía. Parece ser que la domesticación de estas especies tuvo lugar casi simultáneamente en varias regiones vecinas del próximo Oriente, pero la Anatolia es aquí la más relevante porque, desde allí, las especies recién domesticadas pasaron a Europa.

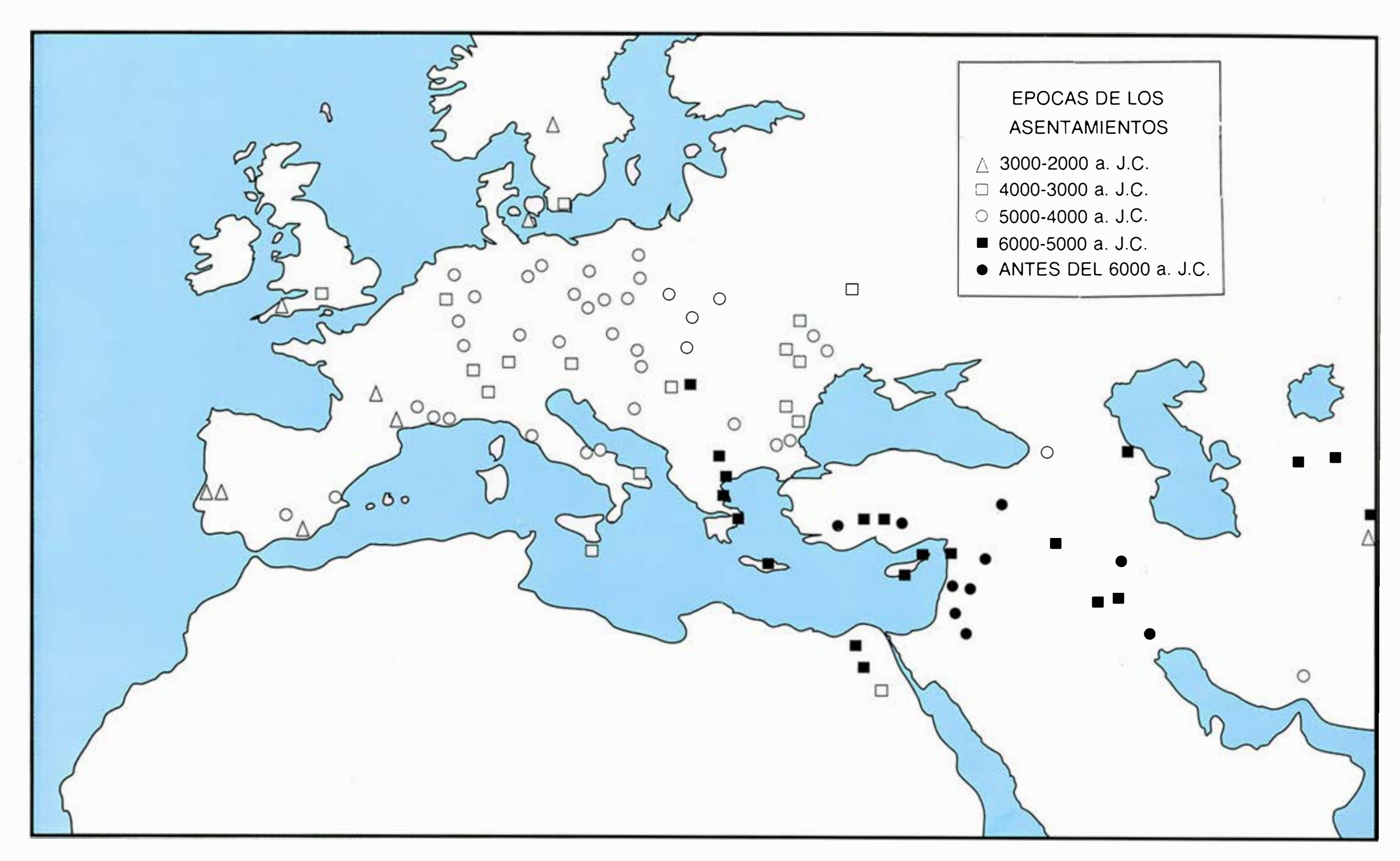
¿Qué supuso, hablando en términos demográficos, esta difusión de la agricultura? Albert J. Ammerman y Luca L. Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford, han ofrecido una elegante respuesta: un modelo que denominan "ola en avance". Su modelo presupone que la economía agrícola fue transmitida por los movimientos locales de los campesinos y de sus progenies.

Una vez extendida la agricultura por determinada zona, aumentaría allí rápidamente la densidad de población. Ammerman y Cavalli-Sforza indican que la agricultura podría haber instado un incremento de 50 veces la densidad de población considerada característica de las anteriores economías de caza y recolección eventual: un habitante por cada 10 kilómetros cuadrados. Conforme al modelo de "ola en avance", el aumento de la densidad de población es decisivo.

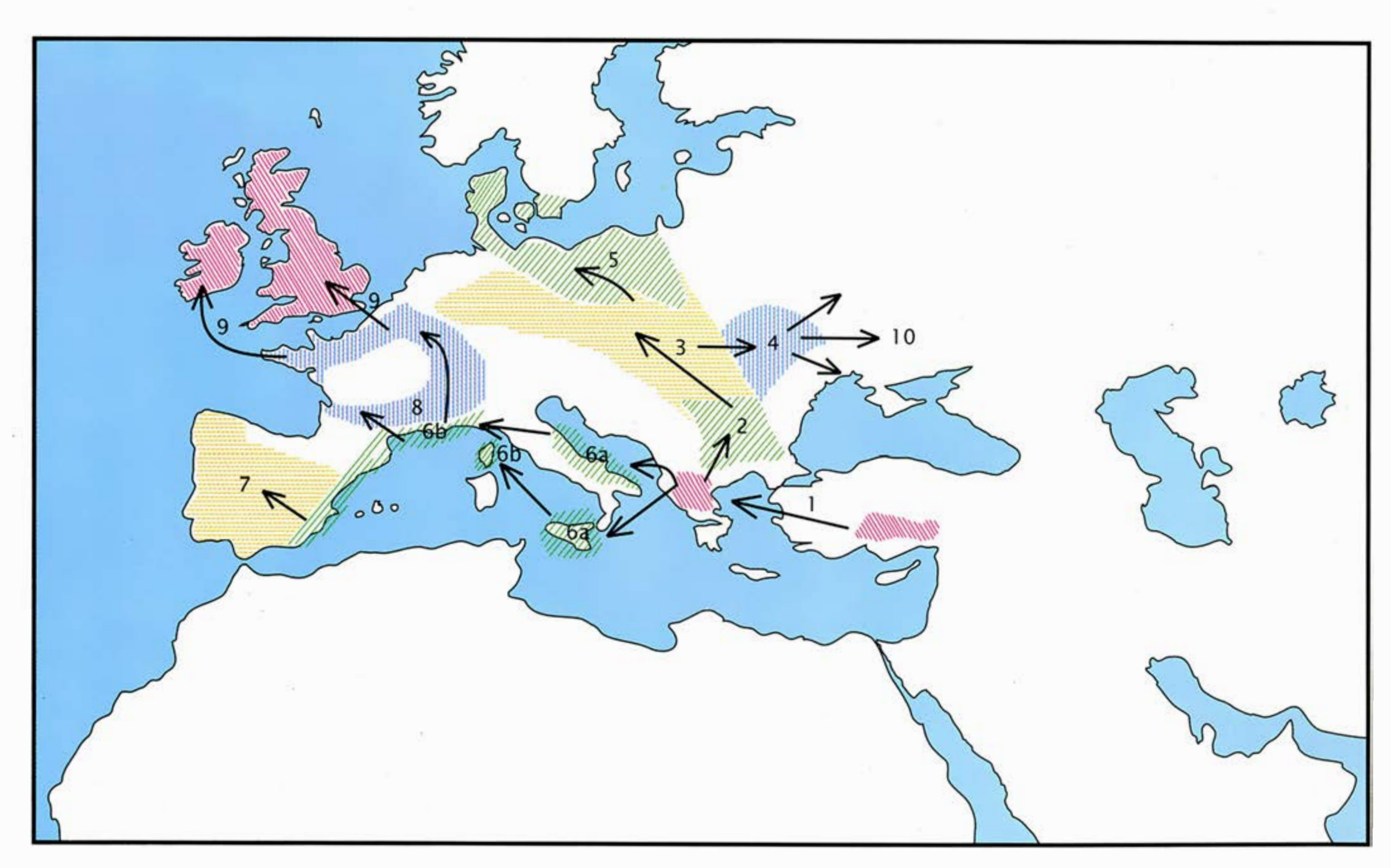
Ammerman y Cavalli-Sforza suponen intervalos de 25 años entre las generaciones. Admiten también que, al alcanzar la mayoría de edad cada individuo se aleja 18 kilómetros (en una dirección fortuita) del hogar de sus padres para establecer su propia casa de labranza. Basando sus cálculos en estos supuestos, Ammerman y Cavalli-Sforza señalan que la agricultura podría haberse extendido por Europa como una



5. HIPOTETICA "INVASION KURGANA", que convierte a los indoeuropeos originarios en jinetes guerreros que habrían salido de su territorio natal, situado al norte del mar Negro (*color rojo*) a comienzos del cuarto milenio a.J.C. El mapa está basado en un dibujo de Marija Gimbutas, de la Universidad de California en Los Angeles. La primera oleada de invasiones, según este modelo, llevó a los guerreros a Grecia allá por los años 3500 a.J.C. Desde allí se desparramaron hacia el norte y hacia el sur; las flechas rojas muestran sus movimientos después del año 2500 a.J.C. aproximadamente.



6. DIFUSION DE LA AGRICULTURA por Europa desde su zona originaria en el Oriente Próximo; se produjo durante algo más de 2000 años. En el mapa se indican los sitios en que se han hallado restos de los granos que solían cultivar aquellos primeros labriegos. En Grecia se empezaron a recolectar cereales entre los años 6000 y 5000 a.J.C. Unos 1000 años después los cultivos cerealistas se fueron extendiendo por lo que son hoy Alemania y Polonia.



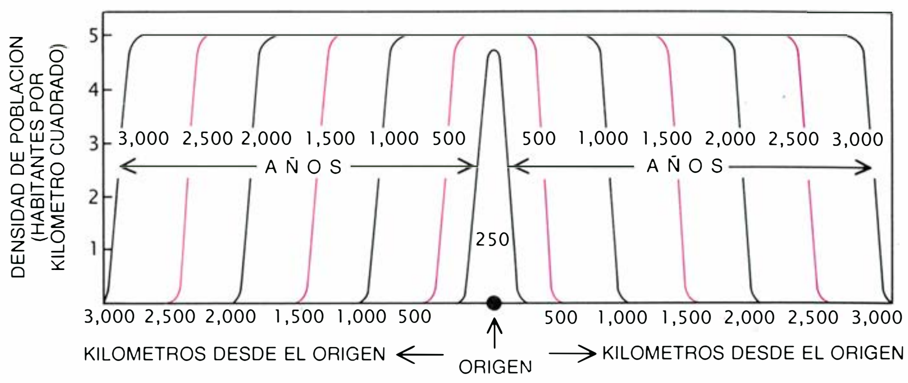
7. ESTA SECUENCIA de las transformaciones lingüísticas ha sido propuesta por el autor como paralela a la difusión de la agricultura; cada transformación se indica con un número. La transformación inicial (*1*) fue la del paso de la más temprana cultura agrícola de Anatolia, tierra natal del lenguaje proto-indoeuropeo, a la de la Grecia central, donde aquel lenguaje ancestral posteriormente se convirtió en el griego. Cada transformación posterior a ésta inicial conllevó, a su vez, la subsiguiente formación de una nueva lengua o de un nuevo grupo de lenguas. (Recreación realizada por Johnny Johnson.)

oleada que avanzase a la velocidad media de un kilómetro al año. A este ritmo se requerían unos 1500 años para que la economía agrícola llegara desde Anatolia hasta el norte de Europa, lo cual se corresponde perfectamente con los datos arqueológicos disponibles.

Por descontado que ningún modelo basta por sí solo para describir adecuadamente un proceso social tan complejo como el de la llegada de la agricultura a Europa. La diversidad de suelos y de climas, entre otras condiciones, implican que la realidad diferirá del modelo en aspectos importantes. Además, el de la ola en avance no es, ni mucho menos, el único modelo que se pueda aplicar, como lo han señalado el arqueólogo Marek Zvelebil, de la Universidad de Sheffield, y su padre Kamil Zvelebil, lingüista de origen checo que vive actualmente en Holanda. Si la población local de cazadores-recolectores hubiese adoptado la agricultura de sus vecinos, la difusión de la agricultura podría haberse producido algo más lentamente y sin remplazo lingüístico, ya que los cultivadores serían los nativos con su nueva economía, en vez de unos advenedizos que hablasen su propia lengua, nueva para los indígenas.

La realidad sería, probablemente, una mezcla de estos dos procesos. La agricultura podría muy bien haber sido introducida en Grecia por gentes de fuera, y a continuación en los Balcanes, en Europa central y en la Italia meridional. En otras regiones, empero, la agricultura puede que haya sido adoptada por la población indígena, supuesto este que explicaría la anómala persistencia de varias lenguas no indoeuropeas. Una de ellas es el idioma vascuence, que ha sobrevivido hasta hoy. Otra es la lengua etrusca, del centro de Italia, que sobrevivió hasta los tiempos de los romanos. Varias otras lenguas de incierta oriundez, entre ellas el íbero, arcaico idioma de España, y el picto, idioma precéltico de Escocia, son susceptibles de explicaciones similares.

Sean cuales fueren los detalles de la entrada de la agricultura en regiones particulares, el conjunto del proceso proporciona una coherente alternativa a la descripción convencional de cómo se introdujo en Europa la lengua indoeuropea. El nuevo cuadro se diferencia notoriamente del anterior. Sus inmigrantes procedían de Anatolia y no de las estepas euroasiáticas, y habrían llegado (hacia el 6500 a.J.C. aproximadamente) varios milenios antes de lo que se ha solido sugerir. Mi hipótesis implica también que los primeros hablantes indoeuropeos no eran guerreros invasores que tuvieran una sociedad centralmente organizada, sino campesinos cuyas sociedades eran básicamente igualitarias y que en el curso de una generación quizá no se apartasen nunca más que unos pocos kilómetros del lugar en que habían nacido.



8. EL MODELO "OLA EN AVANCE", formulado por Albert J. Ammerman y Luca L. Cavalli-Sforza, de la Universidad de Stanford, representa los efectos del cultivo agrícola sobre la densidad de población. La agricultura puede sustentar a densidades mucho mayores que las economías de caza y recolección. En el proceso de introducción de la agricultura en nuevas regiones, hasta los menores movimientos de los jóvenes para apartarse de los campos de sus padres y roturar otros convirtiéndolos en sus nuevas fincas propias permiten que la agricultura se extienda por más y más territorios como una "ola que avanza". Estas curvas representan la densidad de la población en relación con el origen de la agricultura.

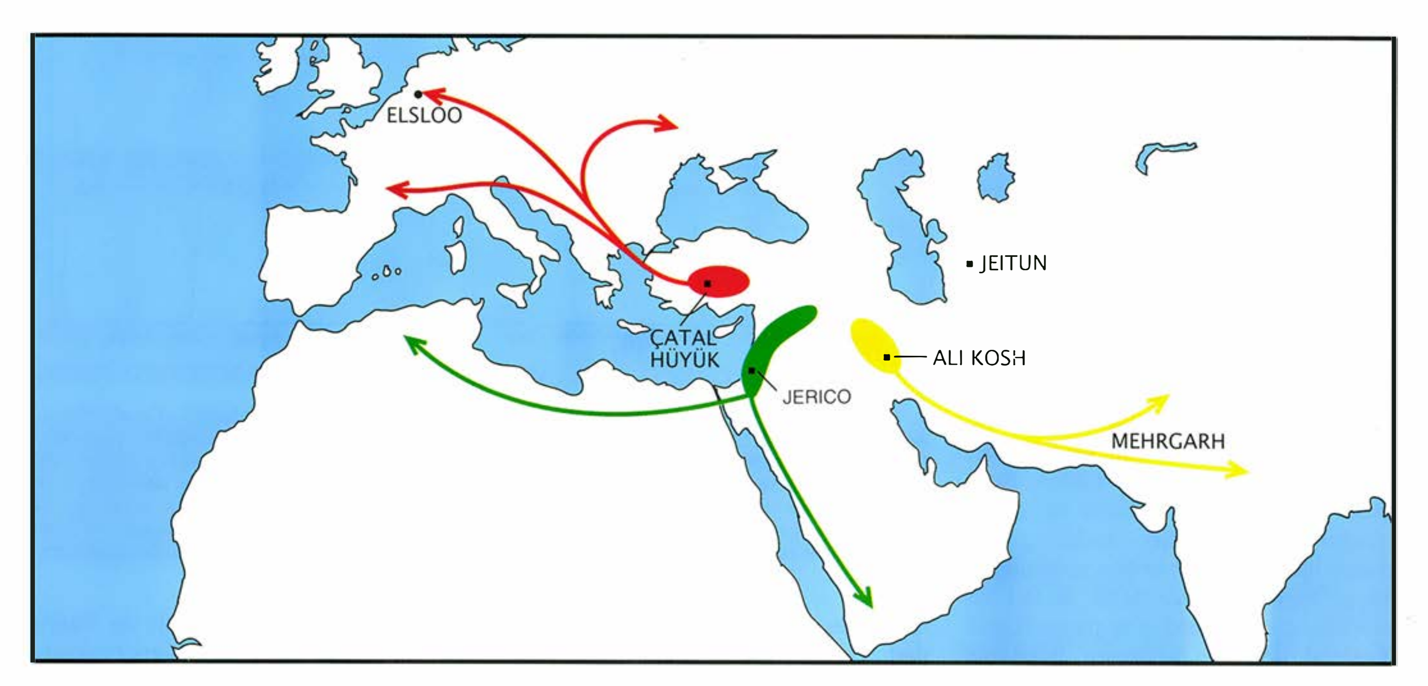
Esta hipótesis conlleva algunos corolarios significativos para la prehistoria de la región esteparia de Rusia y para la prehistoria europea en general. Ciertamente, mi modelo invertiría la dirección que a la influencia entre las estepas y la Europa de occidente le trazaran Childe y Gimbutas. Según la nueva hipótesis, sería lo lógico que la agricultura y la primitiva lengua indoeuropea llegaran a las estepas rusas desde occidente, y no el proceso inverso. Y hay indicios en Ucrania de arcaicos asentamientos o poblados de agricultores con trigo y cebada importados, casi con certeza, de occidente: de los Balcanes, adonde el cultivo de cereales había llegado ya de Anatolia vía Grecia. Por consiguiente, los primeros que hablaron el proto-indoeuropeo en la región de las estepas es probable que se comunicaran en una lengua de origen anatolio y que había pasado ya a través de Grecia y de los Balcanes antes de arribar a los territorios situados al norte del mar Negro.

En un sentido más general, si la venida del indoeuropeo a Europa la retrasamos hasta el 6500 a.J.C., la prehistoria europea mostraría una continuidad bastante superior de lo que se había creído. No se dio una brusca discontinuidad a principios de la edad de Bronce, representada por "la llegada de los Indoeuropeos", como se explica en muchos manuales de prehistoria. Tampoco se asistió a una brusca discontinuidad en la edad del Hierro, que tantos consideran representada por la llegada de los celtas al norte de Europa. La lengua celta habría evolucionado en la Europa occidental, derivándose de raíces indoeuropeas. En vez de un grupo extraño eliminado por los indoeuropeos, las gentes que construyeron Stonehenge y los demás grandes monumentos megalíticos de Europa serían indoeuropeos que hablaban una forma de la lengua indoeuropea de la que descienden las lenguas celtas.

Con esta perspectiva, la primitiva historia de Europa aparece en su conjunto como una serie de transformaciones y adaptaciones evolutivas a partir de un lenguaje indoeuropeo, común y base, al que se sumaron las aportaciones de unos pocos lenguajes supervivientes no indoeuropeos. La sucesión de los acontecimientos no se hilvanaría con migraciones venidas de fuera, sino mediante una serie de complejas interacciones dentro de una Europa que era ya fundamentalmente agrícola en economía e indoeuropea en lengua.

Hasta aquí he centrado la atención en Europa, pero la hipótesis de que la difusión del lenguaje va vinculada a la diseminación de la agricultura tiene implicaciones que rebasan con mucho los límites de este continente. Los datos arqueológicos muestran que no fue Anatolia la única región del globo donde tuvo lugar la más antigua domesticación. La zona en que se originó la agricultura comprendía por lo menos otras dos regiones más o menos cerradas e independientes: la de Levante, faja de unos 50 a 100 kilómetros de anchura que orlaba las costas mediterráneas de lo que hoy es Jordania, Líbano, Siria e Israel, y la región de Zagros, en los actuales Irak e Irán [*figura 9*].

Dado que el modelo demodifusivo de "ola en avance" se basa principalmente en la capacidad de la agricultura para incrementar la densidad de pobla-



9. EN LA ZONA EN QUE SE ORIGINO LA AGRICULTURA había tres "lóbulos" o núcleos, desde cada uno de los cuales se difundió una gran familia de lenguas: el de Anatolia, donde está Çatal Hüyük, puede que fuese la cuna de las lenguas indoeuropeas; otro segundo lóbulo, en el que se incluye Jericó, fue quizá la tierra patria de las lenguas de Egipto y del norte de Africa; y el tercero, donde se encuentra Ali Kosh, tal vez fuese la región nativa de un grupo de lenguas de la India y del Pakistán que luego fueron reemplazadas por otras del grupo indoeuropeo. Elsloo, Jeitún y Mergar son primitivos asentamientos de agricultores situados en estas tres grandes sendas de difusión. Las direcciones, aunque hipotéticas, se basan en la lingüística y la genética.

ción, sería de esperar que dondequiera que se originase la agricultura irradiara en derredor una oleada comparable a la de la difusión por Europa. En lo que concierne al Levante, el terreno exige que una tal ola se moviera por el sur hacia el interior de la península de Arabia y por el oeste a lo largo del norte de Africa. En el caso de la región de Zagros, la ola avanzaría probablemente hacia el sudeste y el este, internándose por Asia.

Ahora bien, hay múltiples pruebas de que la agricultura llegó a Africa, al norte del Sahara, no mucho después de haberse introducido en Europa. Me gustaría poder asegurar que llegó allí mediante un proceso demodifusivo idéntico al que tuvo lugar en Europa. Pero, ¿qué decir entonces del aspecto lingüístico de tal proceso? En gran parte del norte africano el grupo lingüístico dominante es el afroasiático, que incluye el egipcio antiguo y el bereber, así como el grupo de las lenguas semíticas, que a veces se piensa que tuvieron su origen en Arabia. Cabe dentro de lo posible, sin embargo, que todas estas lenguas se derivasen de una raíz proto-afroasiática formada en el sector levantino de la cuna de la agricultura.

Volviendo al tercer sector, a aquel cuya base es la región de Zagros, podría predecirse que la economía agrícola se iría propagando hacia el este por el sur del Irán para llegar hasta el Pakistán. En conexión con esto, conviene advertir que el lingüista David McAlpin, de la Universidad de Londres, ha demostrado no hace mucho que el elamita, idioma que se sabe fue hablado en el antiguo reino de Elam (hoy parte del Kuzistán, en el suroeste del Irán) está emparentado con las lenguas dravídicas de la India. Tal vez la ola en avance hacia el sudeste llevase al antepasado común de los idiomas elamita y dravídicos a través de la India y del Pakistán. Posteriormente, el lenguaje proto-dravídico habría sido desplazado por las lenguas indoeuropeas que aún hoy se siguen hablando en la India.

Esta versión un tanto amplificada del modelo de "ola en avance" viene a situar muy próximos unos a otros, en el cercano Oriente de hace unos 10.000 años, los lenguajes ancestrales de los grupos indoeuropeo, afroasiático y dravídico. Aunque todavía hipotético, este cuadro está recibiendo un considerable apoyo de recientes trabajos lingüísticos y genéticos.

Hace ya más de 20 años, los lingüistas soviéticos Vladislav M. Illich-Svitych y Aron Dolgopolsky sostenían que cierto número de familias lingüísticas euroasiáticas, incluidas, entre otras, la indoeuropea, la afroasiática y la dravídica, estaban emparentadas y formaban una "superfamilia": la Nostrática. El reconocimiento de la existencia de superfamilias, que puede representar un gran salto adelante en la lingüística, es aún materia de controversia. De hecho, la obra de estos dos especialistas soviéticos sólo ahora está empezando a ser conocida en Occidente. Es de notar, con todo, que también sugirieron que Anatolia podría ser la tierra de origen del proto-indoeuropeo. Dado que yo desconocía sus puntos de vista cuando fragüé mi hipótesis, es sorprendente esta convergencia.

La convergencia de opiniones es reforzada por algunos descubrimientos genéticos realizados recientemente por el equipo de investigación de Cavalli-Sforza y por el de Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley. Ambos equipos emplearon métodos estadísticos para analizar los grupos sanguíneos de las poblaciones actuales e inferir sus afinidades genéticas. Sacaron la conclusión de que hay una estrecha relación genética que vincula a los pueblos que hablan los idiomas afroasiáticos con los que hablan los indoeuropeos y con los que hablan los dravídicos, entre otros. Sus hallazgos están, pues, en armonía con la hipótesis de la superfamilia Nostrática y quizá también con la hipótesis de que la aparición de la agricultura guarda estrecha relación con la formación y la distribución de las lenguas actuales.

Dando un último paso atrás y adoptando el enfoque más global posible, la propuesta de que cabe hacer hipótesis lógicas acerca de los protolenguajes y los agrupamientos lingüísticos existentes nada menos que allá por el año 10.000 a.J.C., quizás abra finalmente la vía hacia una mejor comprensión del complejo fenómeno de la diversidad de las lenguas humanas. La mayoría de los

especialistas (aunque desde luego no todos) creen hoy que la capacidad de entenderse mediante el lenguaje que caracteriza a las poblaciones humanas emergió con el *Homo sapiens sapiens*, la forma anatómicamente moderna de nuestra especie. Nuevos descubrimientos logrados en Israel y en el sur de Africa parecen indicar que la transición evolutiva al *Homo sapiens sapiens* se produjo hace unos 100.000 años. No mucho después de aquellas fechas, la especie humana moderna se esparció, probablemente desde Africa, y fue poblando amplias extensiones del globo. Esta evolución biológica y esta dispersión constituyen el marco dentro del cual se han de explicar la capacidad humana del habla y la diversidad de las lenguas.

Sería erróneo, sin embargo, suponer que con esto se haya dicho aquí la última palabra. Aunque he terminado con consideraciones globales, empecé poniendo la mira en un blanco relativamente limitado: criticar la explicación comúnmente aceptada del origen de las lenguas indoeuropeas. Mi propuesta provisional de un primitivo origen anatolio se corrobora en recientes investigaciones lingüísticas y genéticas. El cuadro definitivo habrá de ser, sin duda, más complejo que el que aquí he esbozado, contendrá varios episodios históricos y reflejará diferentes modelos teoréticos. Me atrevo a predecir, con todo, que, cuando se consiga una comprensión más completa, la difusión de la agricultura por Europa a partir de Anatolia constituirá una parte importante del relato.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INDO-EUROPEAN AND INDO-EUROPEANS. Dirigido por George Cardona, Henry M. Hoenigswald y Alfred Senn. University of Pennsylvania Press, 1970.

THE NEOLITHIC TRANSITION AND THE GENETICS OF POPULATIONS IN EUROPE. Albert J. Ammerman y L. L. Cavalli-Sforza. Princeton University Press, 1984.

ARCHAEOLOGY AND LANGUAGE: THE PUZZLE OF INDO-EUROPEAN ORIGINS. A. Colin Renfrew. Cambridge University Press, 1988.

NOSTRATIC. Mark Kaiser y V. Shevoroshkin in *Annual Review of Anthropology*, vol. 17, págs. 309-329; 1988.

RECONSTRUCTING LANGUAGES AND CULTURES: ABSTRACTS AND MATERIALS FROM THE FIRST INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY SYMPOSIUM ON LANGUAGE AND PREHISTORY, ANN ARBOR, NOVEMBER 8-12, 1988. Dirigido por Vitaly Shevoroshkin. Studienverlag Dr. Norbert Brockmeier, 1989.

IN SEARCH OF THE INDO-EUROPEANS: LANGUAGE, ARCHAEOLOGY AND MYTH. J. P. Mallory. Thames and Hudson, 1989.

Taller y laboratorio

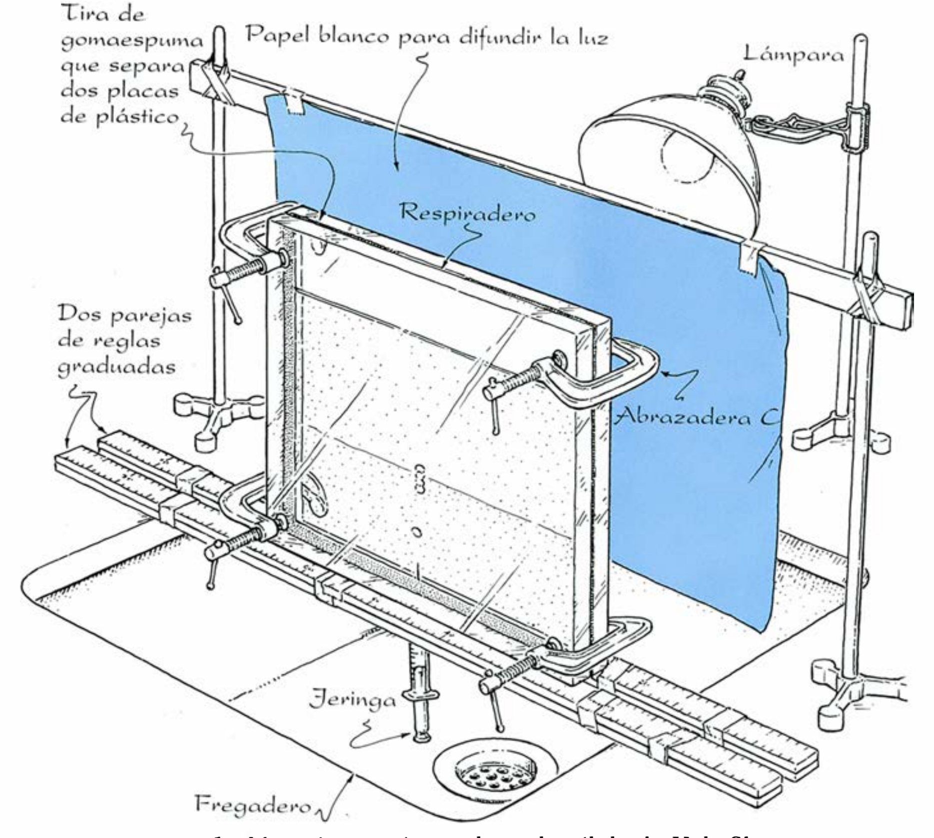
Cómo construir una célula de Hele-Shaw y observar burbujas en un fluido viscoso

Jearl Walker

Las burbujas de aire que ascienden en el seno de un fluido viscoso adoptan curiosas formas, combinándose e interactuando de manera desconcertante. Este comportamiento acostumbra pasar inadvertido, ya que es difícil observar las burbujas en los recipientes ordinarios; en particular, si el líquido es opaco. Un procedimiento para reforzar la visibilidad y, a la vez, reducir en algo la complejidad de los distintos movimientos y combinaciones consiste en introducir el fluido en una célula de Hele-Shaw, dispositivo así llamado en honor de Henry S. Hele-Shaw, el ingeniero inglés de principios de siglo a quien debemos la idea.

A grandes rasgos, una célula de Hele-Shaw consta de dos placas transparentes separadas por un pequeño intersticio. Entre ambas placas, a lo largo del borde, se dispone un separador de poco espesor cuya misión es mantener el intervalo y evitar las pérdidas de fluido. Las burbujas penetran en la célula a través de un orificio abierto en uno de los cantos. El movimiento del fluido en el interior celular puede lograrse mediante una bomba conectada a otros orificios. Otra posibilidad consiste en mantener la célula inclinada o montada verticalmente y que el efecto combinado de la gravedad y el empuje hidrostático se encargue de mover fluido y burbujas.

La ventaja más notable de las células de Hele-Shaw es que mantienen las burbujas siempre a la vista. Aun cuando el fluido en sí sea opaco, una capa fina del mismo será transparente, pues apenas absorbe luz. Además, el movimiento del fluido es bidimensional a todos los efectos; resulta más fácil estudiarlo entonces que cuando el movimiento tiene lugar en tres dimensiones, dentro de un recipiente más ancho.



1. Montaje experimental con la célula de Hele-Shaw.

Se ha recurrido a las células Hele-Shaw para investigar algunas particularidades de la formación de burbujas y del movimiento de fluidos, pero hasta hace muy poco no se advirtieron ciertos rasgos muy curiosos de las burbujas. En 1986 Tony Maxworthy, de la Universidad de California Meridional, informó de lo siguiente: cuando en el seno de un aceite viscoso de silicona se soltaba una serie de burbujas, una a una, éstas tendían a ponerse en fila y ascender por el fluido como los vagones de un tren. Era frecuente que una "columna de burbujas" –expresión acuñada por Maxworthy– se inestabilizara y que la burbuja de cabeza se escindiera en dos por el centro. Luego, conforme la columna seguía subiendo, la inestabilidad y la escisión progresaban columna abajo, burbuja a burbuja, hasta que resultaban dos columnas distintas.

En experimentos ulteriores, Maxworthy y algunos investigadores más estudiaron las formas que adoptan las burbujas de aire cuando se mueven en glicerina y otros fluidos viscosos contenidos en células de Hele-Shaw. Pudiérase creer que la tensión superficial confiere a las burbujas formas siempre circulares o levemente ovaladas, pero lo cierto es que se dan unas cuantas configuraciones extrañas que resultan estables.

¿Podría yo conseguir columnas de burbujas, y esas formas extrañas de las burbujas, con una célula casera de Hele-Shaw? En un comercio de mi barrio especializado en artículos de plástico compré dos placas cuadradas de plástico acrílico de 40 centímetros de lado y 2 de grueso. Como separador me servía de tiras finas de espuma, de las que venden en las ferreterías para hermetizar las ventanas. Esas tiras llevan una cara adhesiva que se pega muy bien al plástico acrílico. En tres de los bordes de una placa pegué otros tantos

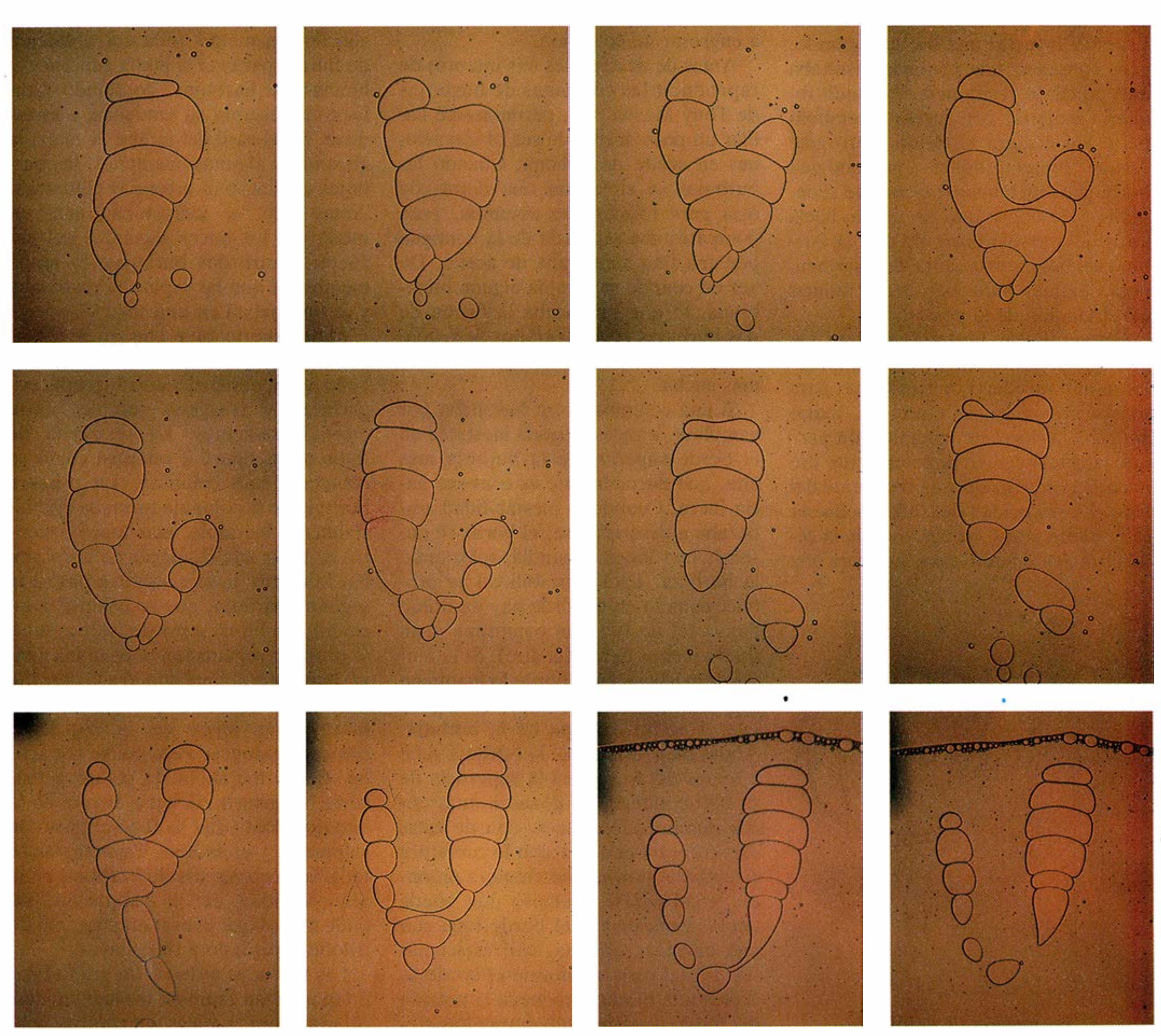
trozos de tira. En el cuarto borde apliqué dos tiras más cortas, de tal modo que entre ellas quedara un agujero de tamaño suficiente para servir de respiradero.

Deposité entonces la placa en una toalla de papel y sobre la superficie delimitada por las tiras vertí un fluido hasta cubrir aproximadamente la mitad de la superficie. Luego, coloqué la segunda placa sobre la primera, cuidando de encuadrar bien los cantos. Comprimí las placas una contra otra con cuatro tornillos en C aplicados a cada lado, uno junto a cada esquina. De este modo las placas quedaron separadas menos de un milímetro, aunque la anchura no era constante en toda la célula a causa de la presión del fluido, que llenaba casi toda la célula.

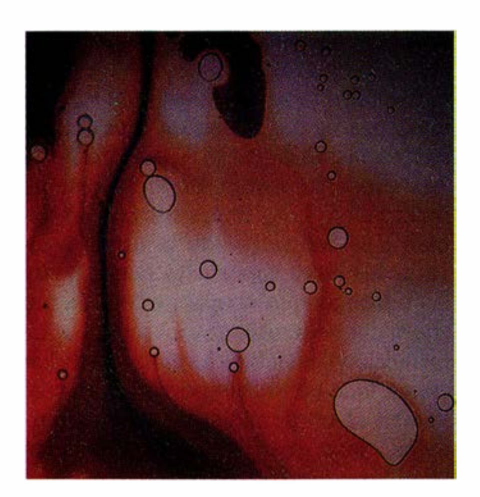
Puesto que mi intención era que las burbujas se movieran por gravedad dentro del fluido, necesitaba montar verticalmente la célula con el respiradero arriba. Como algunos de los fluidos que empleé rezumaban lentamente por la juntura inferior, tuve que trabajar encima de un fregadero. Como soporte de la célula dispuse un puente con cuatro reglas. Estas las uní por pares con cinta adhesiva y tendí las dos parejas de un lado a otro del fregadero. Sobre esta especie de puente equilibré la célula, con la tira de espuma del fondo centrada entre ambas reglas [*figura 1*]. En el otro lado del fregadero instalé un foco sujeto a un soporte de laboratorio. Para difundir la luz coloqué una hoja grande de papel blanco entre el foco y la célula.

Muchas veces se veían burbujas en la célula sin más que colocarla en el puente, que habrían quedado atrapadas al cerrar las placas. Todas estas burbujas aparecían claramente delimitadas por una línea oscura, mientras que el interior de las burbujas y el resto de la célula quedaban siempre uniformemente iluminados. Esas líneas oscuras se debían a la refracción de la luz al atravesar las leves superficies curvadas de las burbujas que ocupaban toda la anchura del intersticio entre las placas. La refracción desviaba los rayos de luz hacia un lado de mi campo visual, lo cual dejaba al borde más oscuro. Las burbujas, muy bien definidas, parecían trazadas a lápiz.

Para crear más burbujas, introduje la aguja de una jeringa por el hueco existente entre las vigas del puente y luego, con cuidado, pinché con ella la tira de espuma del fondo de la célula. Con la



2. *Columna de burbujas escindiéndose y recombinándose.* **(De izquierda a derecha y de arriba abajo.)**



3. Estelas de las burbujas.

jeringa llena de aire, podía inyectar en el fluido la pequeña cantidad de aire necesaria para formar una burbuja. Esta crecía gradualmente, se separaba de la aguja y ascendía célula arriba. Era fácil inyectar una burbuja grande, pero conseguir una pequeña resultaba más difícil: la resistencia del fluido requería empujar con fuerza el émbolo para que cediera el fluido, pero este "saque" brusco producía a menudo una burbuja de un tamaño mayor que el deseado. Descubrí que si tiraba hacia atrás del émbolo antes de que la burbuja abandonara la punta de la jeringa, podía extraer parte del aire y reducir así el tamaño de la pompa.

Fotografié las burbujas con mi cámara de 35 milímetros y para ampliarlas monté un juego de tres lentes para tomas próximas. Durante las tomas apagaba las luces de la habitación para que la célula estuviera únicamente iluminada por la luz difusa procedente del foco. La viscosidad del fluido solía ser lo bastante alta y los confines de la célula suficientemente estrechos para que las burbujas se movieran pausadamente; ello me permitía enfocarlas y fotografiarlas antes de que se desplazaran. (Esta lenta migración de las burbujas implicaba también que cada ensayo necesitaba al menos una hora de observación; a veces, mucho más.) Si bien disponía de cierta cantidad de película con color compensado para el foco, empleé casi siempre película no compensada, más fácil de encontrar; ésta me proporcionó fotos de tono muy poco natural, tal como se apreciará en algunas de las ilustraciones.

Hice ensayos con fluidos diversos. En una droguería encontré glicerina y después rebusqué en los estantes, tanto de esta tienda como de varios supermercados, a la caza de más sustancias. Cuando veía un líquido envasado en material transparente, ponía el envase boca abajo y observaba el ascenso de alguna burbuja. Si ésta se movía lentamente, el líquido era viscoso y pasaba a engrosar mi colección.

Antes de describirles mis intentos de reproducir las columnas de burbujas de Tony Maxworthy, permítaseme hablar un poco acerca de sus observaciones en aceite de silicona. Cuando las burbujas se alineaban una detrás de otra para formar una columna, cada pompa estaba separada de la contigua por una fina membrana de aceite. De vez en cuando se rompía alguna membrana, lo que provocaba la fusión de dos burbujas cuyos costados se relajaban para formar una nueva burbuja, más ancha.

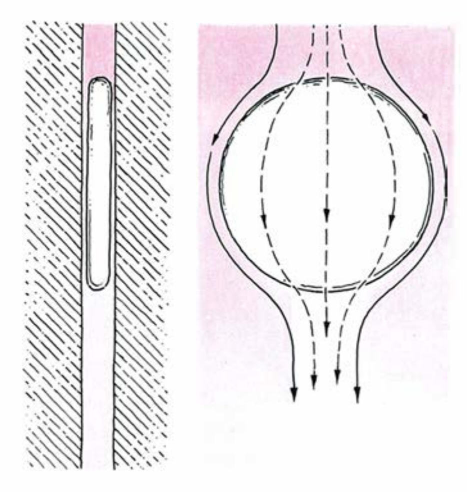
Si una columna no se fusionaba por completo, a veces se hacía inestable en el borde superior de la burbuja más alta, que normalmente es convexo hacia fuera. Cuando la inestabilidad empezaba a desarrollarse, el borde se ensanchaba y luego se hundía, aplastando la burbuja. Esta inestabilidad se produce cuando en el borde hay un fluido denso (el aceite) que comprime a un fluido menos denso (el aire). Si la tensión superficial en el borde lo mantiene convexo durante un tiempo, impide que el aceite irrumpa en la burbuja. Ahora bien, conforme la burbuja sube a través del aceite, en la superficie de su borde anterior se generan unas ondas diminutas. A veces, una de estas olas crece hasta desbaratar la curvatura estable del borde, que empieza entonces a colapsarse. Colapso que puede también iniciarse si el borde topa con una burbuja pequeña, casi estacionaria. En tal caso, conforme el borde se acerca a la burbuja pequeña la presión del fluido comprendido entre ellas crece y puede llegar a ser tan elevada que desencadene el colapso en cuestión.

Si el hundimiento penetra hasta el borde inferior de la primera burbuja, ésta queda dividida en dos. El colapso y la escisión recorrerán entonces el resto de la columna y el tren de burbujas se separará en dos columnas. De éstas, la mayor sufre un empuje hidrostático más fuerte y sube antes que la menor. Cuando la cola de la columna mayor adelanta la cabeza de la columna menor, ésta se ve arrastrada y obligada a unirse a la cola de la primera. En una ocasión, Maxworthy pudo ver una columna donde el colapso y la escisión se iniciaron en el borde superior de la segunda burbuja de la columna. La escisión se propagó columna abajo, pero las dos columnas resultantes siguieron juntas, compartiendo la burbuja de cabeza, que no había sufrido alteración.

Por lo que a mí respecta, examiné concienzudamente toda mi colección de fluidos para ver si podía generar columnas de burbujas, confiando también en observar su tendencia a escindirse. En el caso del jarabe de maíz, la glicerina y algunos champúes, las burbujas no llegaban a formar columnas. Antes bien, se incrustaban unas en otras, y a los pocos segundos del encuentro entre dos burbujas, la tenue membrana que las separaba reventaba y se fusionaban en una sola.

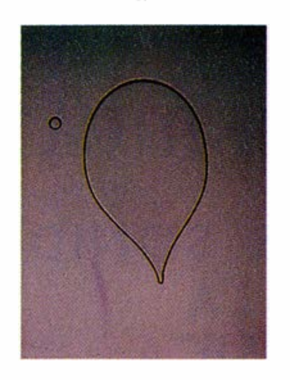
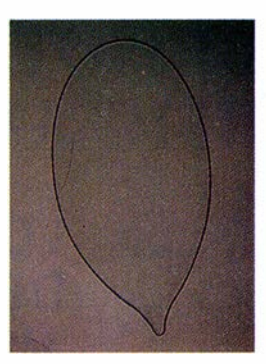
Mejor suerte tuve con otros champúes. El mejor resultó ser un gel de baño compuesto de glicol propileno, glicerina y colágeno soluble, entre otros ingredientes. La secuencia de fotos de la figura 2 muestra cómo se comportó una columna. La primera burbuja de la columna formada era inicialmente inestable, mas luego encontró su lugar a la izquierda de la columna. Mientras, la inestabilidad pasó a la segunda burbuja, que se colapsó y escindió. La bifurcación de las burbujas se propagó seguidamente columna abajo, hasta que al final quedó a la derecha una columna de dos pompas. La columna más larga de la izquierda comenzó entonces a escindirse por arriba. Conforme subía, la columna más corta fue arrastrada hacia la cola de la anterior, hasta que le llegó el turno de colapsarse y escindirse. Contemplando toda esta coreografía de burbujas en la semioscuridad de la habitación, no pude menos que pensar en un grupo de trilobites jugando a tú-la-llevas.

Las burbujas aisladas de gran tamaño mostraban también inestabilidades, colapsándose a veces sin motivo apa-



4. Formación de una estela.




5. *Algunas formas de burbujas en glicerina y en un champú* **(derecha).**

rente. Otras veces el colapso lo provocaba una burbuja pequeña con la que tropezaba la grande en su ascenso. Normalmente, cuando una columna topaba con una burbuja pequeña, era apartada de en medio y la columna desfilaba a su vera. Luego, la burbuja pequeña abría una hendidura en la parte de la columna contigua. Esa hendidura era a veces tan amplia que el costado de la columna se derrumbaba y las burbujas comenzaban a escindirse.

Las columnas tienden a rehuir las burbujas pequeñas que permanecen más o menos estacionarias; sin embargo, las burbujas de mayor tamaño y movilidad las atraen. En más de una ocasión pude observar cómo una columna de gran longitud se desviaba de su trayecto ascendente para dejar a un lado burbujas solitarias; de hecho, la columna ganaba velocidad y las burbujas se apresuraban. Durante la carrera, algunas burbujas de la columna se ensanchaban y estrechaban, de suerte que sus costados izquierdo y derecho se aplanaban e incluso se hundían.

Para que resaltaran a la vista las estelas de las burbujas solitarias, abrí la célula, inyecté una banda de colorante de cocina a todo lo ancho del champú y a continuación volví a cerrar y asegurar la célula. Con esta operación introduje burbujas de aire en el gel. Mi intención era que las estelas se hicieran visibles cuando las burbujas se elevasen surcando el colorante. Cuando una burbuja empezaba en el champú sin colorear, dejaba un reguero incoloro al atravesar la zona de color; cuando se originaba en la zona coloreada, dejaba un reguero coloreado al atravesar la zona incolora; en la fotografía de la figura 3 se muestra el efecto. La longitud de las estelas solía multiplicar varias veces el diámetro de las burbujas que las creaban.

Mi opinión es que esas estelas se deben al fluido que se descarga de las finas capas que envuelven las burbujas. Consideremos una sección vertical que vaya de placa a placa y atraviese una burbuja [*figura 4*]. El aire encerrado en la burbuja está separado de cada placa por una capa de fluido interpuesta. Estas capas son tan delgadas que, durante el ascenso, el fluido pasa por ellas muy lentamente. Conforme penetra fluido por la parte superior de la capa, por debajo de la burbuja se va descargando el fluido que se encuentra en la parte inferior de la capa. Consideremos ahora una sección vertical paralela a las placas y que pase por la burbuja. El fluido que se desliza a los lados de la burbuja en ascenso converge inmediatamente por debajo de la misma y comprime así el fluido descargado de las capas delgadas.

Supongamos que la burbuja se traslade desde el gel incoloro hacia el coloreado. El fluido que lame los costados será coloreado, pero la descarga gradual procedente de las capas delgadas permanecerá incolora durante cierto tiempo. Ocurre que el flujo de gel coloreado comprime la descarga tras la burbuja, configurándose la fina estela incolora que delata el trayecto seguido por la pompa. Una explicación igual cabe para la estela coloreada que deja una burbuja al desplazarse desde el gel coloreado al que no lo está.

Algunos investigadores han descubierto que una burbuja que se mueva en el seno de un fluido viscoso puede adoptar formas ligeramente diferentes según las circunstancias. El tira y afloja entre tensión superficial, empuje hidrostático y presión hidrostática tiende a que la burbuja mantenga su forma circular o elíptica, pero puede que la burbuja presente aplanados los bordes anterior y posterior o adquiera forma de pera, con el borde anterior más dilatado que el posterior. Estas últimas formas son características de la situación que se origina cuando la célula permanece horizontal y el fluido es obligado a moverse dentro de ella.

En 1988, Anne R. Kopf-Sill y George M. Homsy, de la Universidad de Stanford, revisaron la teoría que respalda la aparición de esas formas y aportaron observaciones de nuevas formas aún más curiosas. Descubrieron burbujas dotadas de cola, unas veces corta y redondeada y otras mucho más larga que el diámetro de la porción principal de la burbuja, con un pequeño círculo en la punta. Además, Kopf-Sill y Homsy avistaron una forma, ya predicha por la teoría, en la que el borde posterior es plano y el anterior aparece levemente hundido.

Me apliqué a ensayar los distintos fluidos de mi colección en busca de las distintas formas de burbujas descritas. En la glicerina, el jarabe de confitura, el aceite de maíz, el champú mencionado y otros dos más, las burbujas pequeñas eran circulares. Se veían también otras algo mayores, de forma elíptica y con el eje mayor vertical.

En cierto momento, trabajando con uno de los dos últimos champúes, di con lo que pudiera ser un ejemplar de burbuja que ofrecía el borde anterior hundido; en ese momento mi atención estaba centrada en otras burbujas, por lo que no puedo asegurarles que aquélla no estuviera simplemente alargada hacia un lado, deformada por otra que hubiera pasado junto a ella. En el jarabe, el aceite de maíz y la glicerina, a muchas de las burbujas grandes les salían unas colas cortas en cuanto se ponían en movimiento. Esas colas persistían, aunque temblequeaban un poco. Además, se veían atravesadas por un borde tenue que parecía querer completar el contorno general ovalado de la burbuja.

Me concentré en la glicerina. Cuando una burbuja alcanzaba a otra, la membrana de separación duraba apenas unos segundos antes de que el aire encerrado en las burbujas la rompiera. En la zona antes ocupada por la membrana quedaban unas aristas de glice-

rina, romas y curvas, adheridas a las dos placas. Cuando ascendía la burbuja recién formada, las aristas descendían y sus extremos derecho e izquierdo la deformaban sensiblemente, confiriéndole un contorno piriforme.

A veces, dentro de una burbuja se veía una minúscula gotita de glicerina. Acaso hubiera sido recogida en algún defecto de una de las placas, o bien estuviera adherida a otra partícula contaminante. Cuando esa gotita llegaba al borde inferior de la burbuja, lo empujaba hacia afuera. Cuando la cola de la burbuja se acercaba a la altura de la gotita, la abrazaba y se movía como si la estuvieran agitando.

Trabajaba con la célula en posición vertical. En alguna ocasión la coloqué inclinada porque me interesaba refrenar el ascenso de las burbujas; ponía, entonces, sobre una mesa una hoja grande de papel blanco, en la que apoyaba el canto inferior de la célula y dejaba descansar la parte superior de la misma sobre dos cajas. Al foco le daba una orientación tal que el papel difundiera la luz hacia arriba atravesando la célula. Además, colocaba el canto inferior de la célula coincidiendo exactamente con el borde de la mesa, al objeto de poder seguir inyectando aire con una jeringa.

Si el lector se construyera su propia célula de Hele-Shaw, podría ensayar algunos fluidos viscosos más, tales como la miel, algún postre de gelatina no gelificada o aceites lubricantes. (Acerca de éstos conviene advertir que son especialmente viscosos y ensucian mucho y que, además, dificultan la limpieza de la célula después de su empleo.) Cuando no sea posible situar bien la jeringa en nuestras manipulaciones, para encerrar burbujas de aire en el fluido bastará con levantar un momento la tapa superior y volver a cerrarla antes de que el fluido haya tenido tiempo de enrasarse.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BUBBLE FORMATION, MOTION AND INTERACTION IN A HELE-SHAW CELL. T. Maxworthy en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 173, págs. 95-114; diciembre de 1986.

STABILITY OF BUBBLES IN A HELE-SHAW CELL. S. Tanveer y P. G. Saffman en *Physics of Fluids*, vol. 30, n.º 9, págs. 2624-2635; septiembre de 1987.

TALLER Y LABORATORIO. Jearl Walker en *Investigación y Ciencia*, n.º 136, págs. 94-98; enero de 1988.

BUBBLE MOTION IN A HELE-SHAW CELL. Anne R. Kopf-Sill y G. M. Homsy en *Physics of Fluids*, vol. 31, n.º 1, págs. 18-26; enero de 1988.

Juegos de ordenador

Un ordenador mecano que juega al tres en raya

A. K. Dewdney

"Tuve por vez primera esa experiencia [la universalidad de la computación] antes incluso de ir a la escuela. Todavía no existían los ordenadores; teníamos en cambio juegos de construcciones. Uno de ellos se llamaba TinkerToy... Es curioso que aquellos carretes y varillas basten para construir cuanto se quiera."

—MARVIN MINKSY,
en el prefacio de *LogoWorks*

¿Cuántos de nosotros no recordamos aún los mecanos, aquellos juegos de piezas de nuestra infancia, compuestos por varillas de colores y carretes provistos de agujeros? Metidos en nuestras construcciones infantiles, en aquellas torres y grúas, ¿cuántos de nosotros llegamos a meditar hasta dónde alcanzaría el mundo de los mecanos, cuáles serían sus confines más lejanos? ¿Soñamos quizás en inventos o montajes que llegasen al techo? Es muy posible que sí, pero no disponíamos de piezas suficientes ni del tiempo necesario. Esa fantasía, empero, se materializó hace algunos años, cuando un grupo de estudiantes del Instituto de Tecnología de Massachusetts construyó un ordenador, exclusivamente (casi), con piezas de mecano.

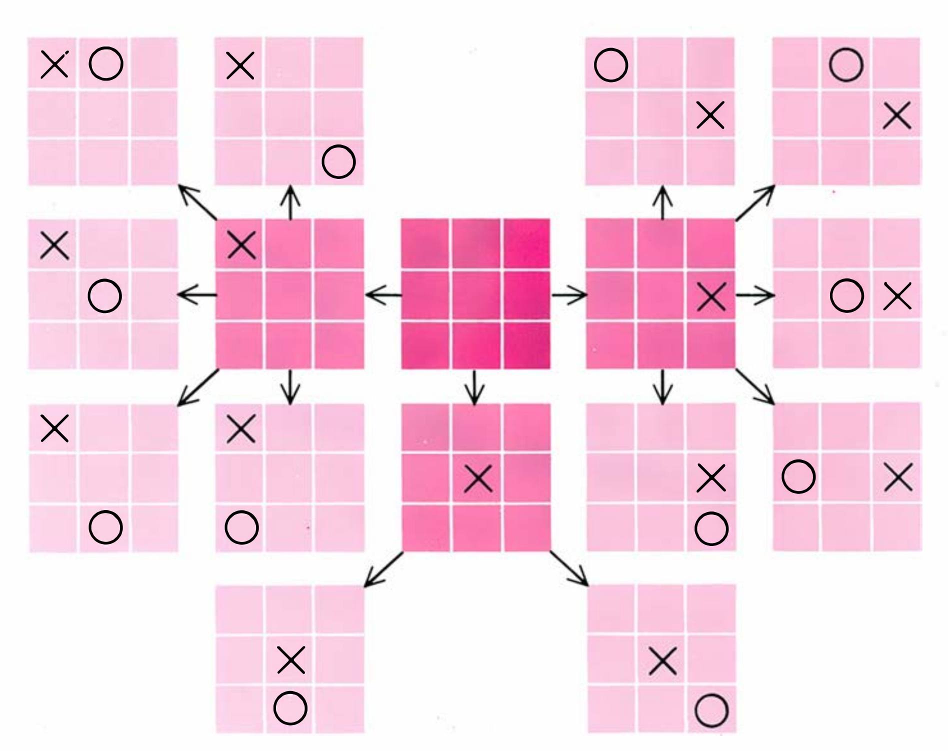
Visto a cierta distancia, el ordenador mecano nos hace pensar en una desbordada fantasía infantil, o mejor, como comentó uno de los componentes del grupo, en una versión con carretes y varillas del laboratorio espacial de la película *2001: Odisea en el espacio*. A diferencia del monolito extraterreno, el ordenador mecano sólo desarrolla mediocres partidas de tres en raya. Un armazón, de color rojo, llamado cabeza de lectura, desciende traqueteando por el frente del monolito. En un cierto punto, el cliqueteo se detiene misteriosamente; una "pieza núcleo" ubicada bajo el armazón echa a girar sobre sí misma y después, con un grato sonido, golpea indirectamente a un "pato de salida", una construcción aviforme. El pato de salida se balancea en su percha y su pico queda señalando a un número, el cual determina la siguiente jugada del ordenador en una partida de tres en raya.

¿Qué es exactamente lo que el ordenador va examinando mientras desciende la cabeza de lectura monolito abajo? Nada menos que 48 hileras de "soportes de memoria", donde están codificadas todas las combinaciones críticas de *X* y *O* que pudieran presentarse durante una partida [*véase la figura 2*]. Cada soporte consiste en una secuencia de carretes lisos conectados axialmente por un largo vástago, dispuestos en nueve grupos de tres cada uno, a razón de un grupo por cada casilla del tablero de tres en raya. La presencia o ausencia de carretes en un grupo indica que el correspondiente cuadro del tablero se encuentra vacante, ocupado por una *X* o por un *O*.

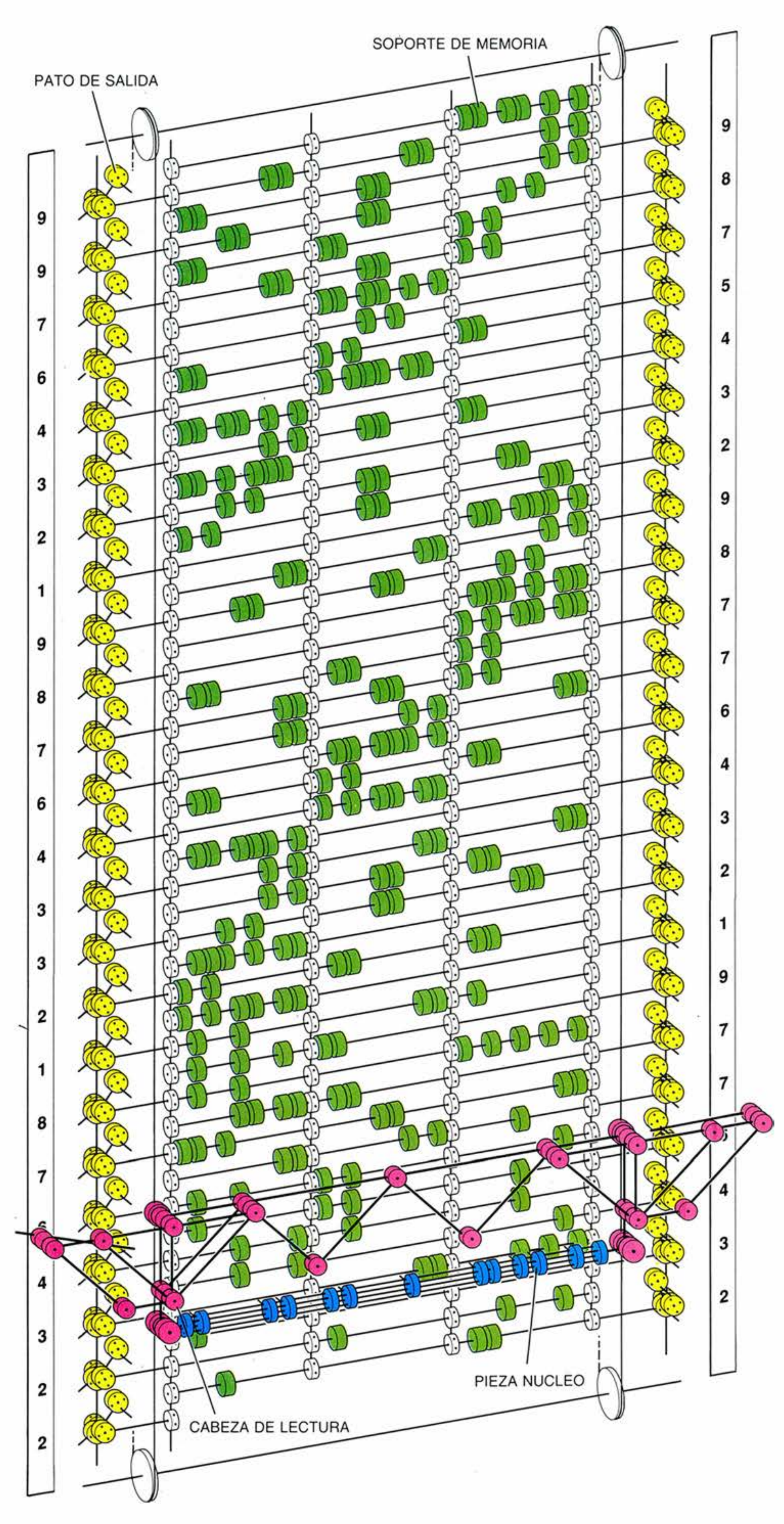
El ordenador mecano no es enteramente automático: es preciso que un operador humano vaya accionando una manivela que haga subir o bajar la cabeza de lectura y se encargue de proporcionar la información de entrada. Después de que el adversario del ordenador efectúa una jugada, el operador se dirige al frente de la máquina para ajustar la pieza núcleo alojada en la cabeza de lectura, para registrar en ella la jugada del oponente. Seguidamente, el operador tira de un cordón para remontar la pieza núcleo y dejarla lista para su próxima rueda de reconocimiento. Cuando la pieza descubre un soporte de memoria que recoge el estado actual del juego, la pieza núcleo entra en rotación y el ordenador señala cuál será su jugada.

La mejor forma de comprender el funcionamiento detallado de la máquina será referir la historia de su creación a manos de los siguientes estudiantes del MIT: Erlyne Gee, Edward Hardebeck, Daniel Hillis, Margaret Minksy y los hermanos Barry y Brian Silverman. La mayoría de los componentes del grupo hace mucho que se licenciaron y emprendieron diferentes carreras profesionales en informática. Es posible que el más conocido de los miembros del equipo sea Hillis, fuerza motriz de Thinking Machines, empresa de informática que produce el ya famoso superordenador de proceso en paralelo bautizado máquina de conexión. (Es posible que los mecanos tengan algo que enseñarnos.)

En 1975, estando Hillis y Brian Silverman en segundo año de carrera, participaron en un proyecto de curso que proponía construir algo digital con mecanos. Los estudiantes se sentaron y



1. Los tres primeros niveles del árbol de juego del tres en raya.



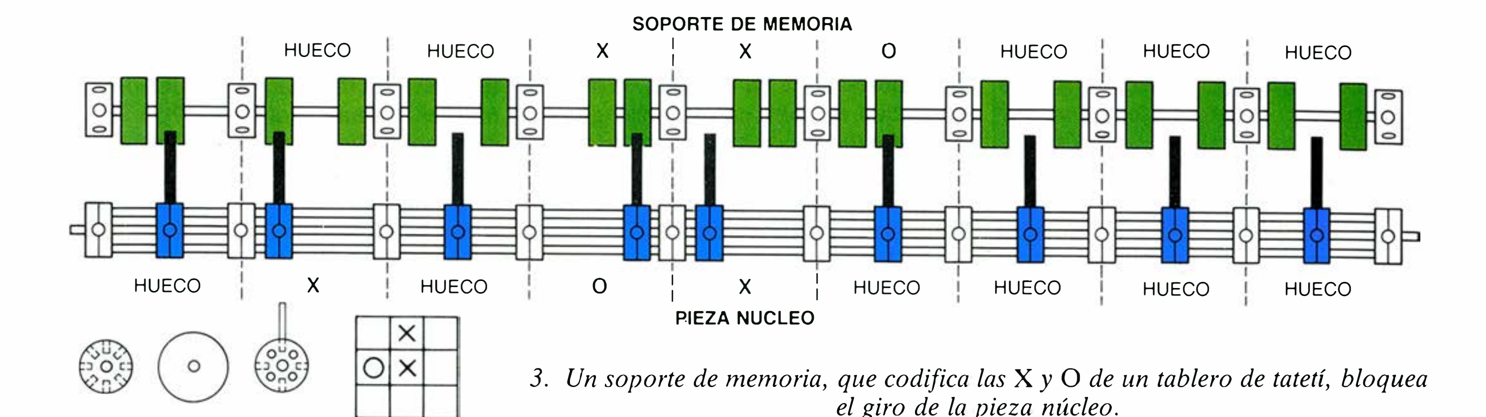
2. El ordenador mecano, listo para una partida de tatetí.

se pusieron a jugar. Uno construyó un inversor, un dispositivo lógico que convierte la señal binaria 1 en la señal binaria 0, y recíprocamente. Otro compuso una puerta O: en cuanto al menos una de las dos señales de entrada del dispositivo fuese un 1, también la salida sería un 1. Los estudiantes comprobaron pronto que los mecanos eran "computacionalmente universales", término teórico con que se denotan los conjuntos de componentes a partir de los cuales resulta posible construir un ordenador totalmente programable. La posibilidad teórica era una cosa; otra muy distinta, sin embargo, las exigencias de tiempo y dinero necesarios.

Exigencias que se vieron satisfechas por sendas no poco tortuosas, a causa del interés que Hillis sentía por los robots. Hillis había hablado abiertamente en varias ocasiones de construir un robot. Tal idea llegó a oídos de Harry Loucks, que era entonces director del Mid-America Center, en Hot Springs, Arkansas. ¿Estarían dispuestos los estudiantes a construir un robot, para exhibirlo en el museo del centro? Los estudiantes se mostraron de acuerdo en principio, pero el proyecto les pareció demasiado complicado. Justo entonces resurgió el antiguo sueño del montaje con mecanos. ¿Aceptaría el centro un ordenador construido con piezas de mecano, en lugar del robot?

Hillis y compañía se pusieron a montar el primer ordenador mecano en un laboratorio del MIT. Su primer modelo, a diferencia del que le sucedería, era un voluminoso cubo cuyos lados medían alrededor de un metro. Resultaba de una complejidad impresionante. Atiborrado de dispositivos lógicos enteramente construidos con varillas y carretes de madera, la máquina mostraba sus jugadas haciendo ondear nueve banderas desde lo alto del montaje. Fue preciso desmontarla para trasladarla a Hot Springs; ensamblada *in situ*, nunca volvió a funcionar bien del todo. De todos modos, constituía una pieza tan intrigante cuan impresionante. (En la actualidad se exhibe en el Museo del Ordenador, en Boston.)

En 1979, Loucks volvió a ponerse en contacto con el grupo constructor. ¿Podrían crear una nueva computadora mecano que funcionase de verdad? En aquella fecha, Silverman se encontraba en Ottawa y Hillis en Boston, dedicados a su carrera profesional. Por teléfono, Hillis y Silverman elaboraron un diseño más perfeccionado. Tenía que ser fiable y, por tanto, sencillo. Decidieron disponer en hileras todas las posibles posiciones del tablero de tatetí e idear algún tipo de mecanismo de lec-



3. Un soporte de memoria, que codifica las X *y* O *de un tablero de tatetí, bloquea el giro de la pieza núcleo.*

tura que fuera desplazándose de hilera en hilera, hasta encontrar una configuración que representase el estado actual del tablero. El acto mismo de detección podría disparar una respuesta predeterminada.

Mientras Hillis consideraba posibles formas de representar el tablero de tres en raya mediante piezas de mecano, Silverman se dedicó a analizar el juego. Para mejor apreciar las complejidades que incluso este pasatiempo infantil comporta, los lectores podrían consultar el árbol de juego que vemos en la figura 1. En el centro del árbol se ubica el tablero inicial, un casillero vacío de tres por tres, donde todavía no se ha situado ninguna *X* ni ningún *O*. De esta plantilla inicial pueden emanar otras nueve, dependiendo de la casilla que *X* decida ocupar. La figura muestra solamente tres posibilidades; las otras seis se deducen de éstas por giro. Cada uno de los tableros del segundo nivel da pie a nuevos casos. Por ejemplo, el tablero en el cual *X* ocupa el cuadro central y otra casilla a continuación genera dos tableros diferentes. Cada uno de los otros dos tableros del segundo nivel engendra cinco nuevos tableros en el tercer nivel.

He podado muchas ramas del árbol de juego del tres en raya por razones de simetría; los tableros eliminados se deducen de los mostrados por meros giros o simetrías axiales. Pero aunque la simetría resulte evidente a los humanos, para que una computadora pueda reconocerla es preciso programarla o cablearla adecuadamente. En un mundo de ingeniería mecano, las operaciones de simetría exigirían estructuras elaboradas y complejas.

Por tanto, Silverman tenía que habérselas con un árbol muchas veces mayor que el fragmento mostrado en la ilustración. Mas la perseverancia dio fruto, en especial, cuando Silverman descubrió que muchos de los tableros posibles se reducían a uno a causa de movimientos obligados. Supongamos, por ejemplo, que dos cuadros de una fila contengan *O* y que el tercero esté vacante. Los contenidos de las otras dos filas son entonces irrelevantes, ya que el otro jugador ha de ocupar necesariamente el tercer cuadro con una *X*, si no quiere perder inmediatamente la partida.

Silverman quedó encantado cuando por fin contabilizó el total de tableros a tener en cuenta: solamente 48. En cada uno de ellos tomó nota de la jugada adecuada que habría de realizar la máquina. La lista de posiciones posibles del tablero, sorprendentemente corta, infundió a Hillis nuevos alientos. El grupo convergió en Hot Springs, relata Silverman, "con la lista de las 48 configuraciones y poco más que una vaga idea de cómo interpretarlas mecánicamente".

(Los lectores de querencias fanáticas —o atrapados por una huelga en un aeropuerto— seguramente disfrutarán desarrollando el árbol de juego en unos cuantos folios. Después de todo, ¿cuánto se tarda en dibujar 48 plantillas de tatetí? Para simplificar las cosas, conviene utilizar cuatro símbolos: *X*, *O*, espacio en blanco y un guión para indicar "es indiferente".)

Ya en Hot Springs, el equipo reunió las materias primas para su odisea de varillas y carretes: 30 cajas de mecano de 250 piezas cada una. Algunos miembros del equipo ensamblaron el armazón de sostén donde habrían de montarse los 48 soportes de memoria. Para explicar la precisa composición y montaje de los soportes, he de hacer una breve digresión y describir los convenios de que se valió el equipo para codificar las posiciones del tres en raya.

Procedieron a numerar los cuadros del tablero de tatetí como sigue:

1 2 3
4 5 6
7 8 9

Seguidamente, cada soporte de memoria fue conceptualmente dividido en nueve tramos consecutivos, donde se almacenaba, de izquierda a derecha, la información relativa al estado de cada casilla del tablero.

Cada tramo fue ulteriormente subdividido en tres secciones iguales, una por cada posible marca que pudiera ocupar la casilla correspondiente, esto es, una *X*, un *O*, o un quedar en blanco. Cada posibilidad se codificó por ausencia de un carrete. Por ejemplo, si cierta casilla estaba ocupada por una *X*, el soporte de memoria no tendría carrete en la primera posición, tendría carrete en la segunda y carrete en la tercera. Análogamente, la ausencia de carrete en la segunda posición denotaba que el cuadro no se había jugado todavía, mientras que la falta de carrete en la tercera posición simbolizaba un *O*. Finalmente, de faltar los tres carretes, el contenido de la casilla era irrelevante.

Mal podemos mencionar los soportes de memoria sin traer a colación la pieza núcleo, un objeto de digital belleza. En ella adquiere todo su significado el sustantivo latino *digitus*, pues el montaje nos recuerda una especie de garra giratoria provista de nueve dedos. Vemos la pieza núcleo y un soporte de memoria en la figura 3.

La pieza núcleo estaba compuesta por nueve secciones idénticas. Cada una poseía su propio dedo, una varilla corta que sobresalía del borde de un carrete deslizante. El dedo podía desplazarse a lo largo del eje de la pieza núcleo dentro de cada sección y llevarse a una de tres posiciones posibles: una para la *X*, una para la *O* y una para el espacio en blanco. En consecuencia, la pieza núcleo podía almacenar cualquier tablero de tatetí en virtud de las posiciones de sus nueve dedos, al ser movidos por el operador humano en correspondencia con cada jugada del humano o la máquina. En la figura 3, los dedos situados en las posiciones consecutivas 2, 1, 2, 3, 1, 2, 2, 2, 2 serían la representación del tablero mostrado.

Hallándose la situación actual del juego almacenada en la pieza núcleo, ¿será necesaria alguna otra forma de memoria en el ordenador mecano? ¿No podrían ensamblarse entre sí dispositivos lógicos que meditasen sobre la situación y acabaran finalmente indicando una jugada? Bueno, sí sería posible, pero semejante ordenador, montado con mecanos, resultaría complicado e inmenso. Los soportes de memoria eliminaron casi por completo la necesidad de pensamiento. Todo cuanto la computadora mecano tenía que hacer era consultar en los soportes de memoria el tablero en curso. La finalidad única de la búsqueda, como es natural, consistía en decidir qué jugada efectuar.

Una ojeada a la figura 2 permite ver con claridad que cada soporte de memoria iba acompañado por un número escrito sobre una tira de papel que colgaba junto a su pato de salida. Estos números constituían la salida de la máquina. Al bajar la cabeza de lectura, cliqueteando sobre las hileras de soportes, la pieza núcleo quiere girar, pero no le es posible mientras al menos uno de los bloques de carretes de un soporte de memoria bloquee a alguno de los nueve dedos de la pieza núcleo. Tan sólo cuando la cabeza de lectura queda adyacente al soporte que representa al tablero actual se liberan los nueve dedos. Es entonces cuando la pieza núcleo gira sobre sí misma.

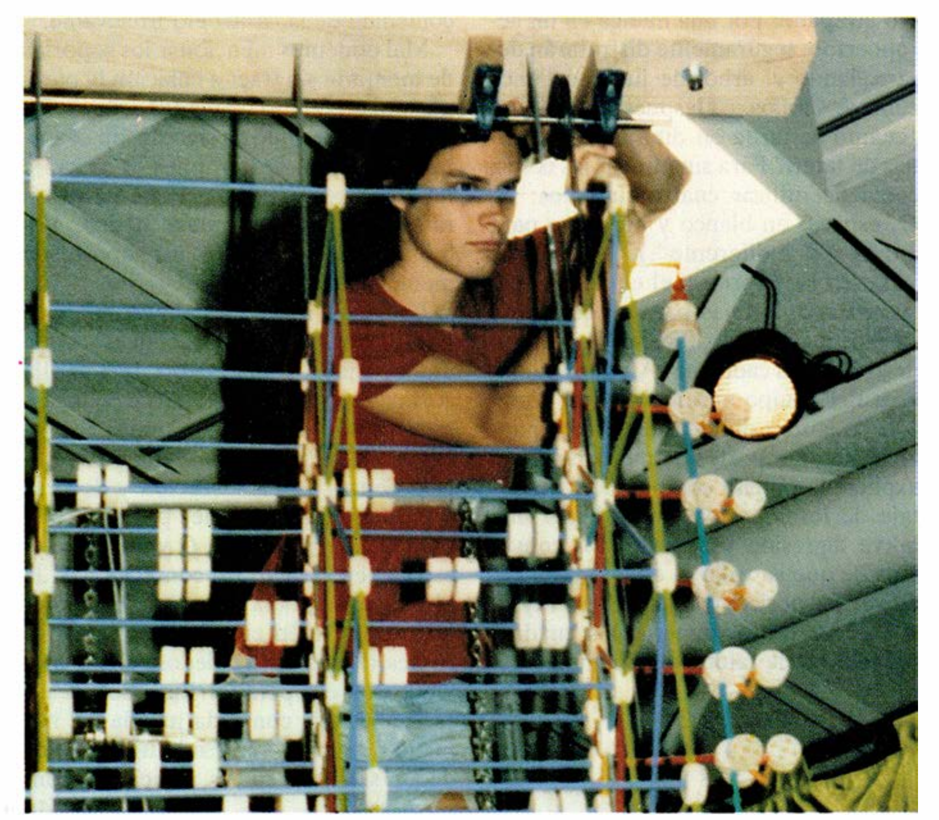
Mediante un mecanismo que hubiera ufanado a Rube Goldberg, un vástago que sobresale de un extremo de la pieza núcleo engrana en otro vástago conectado al pato de salida. De esta forma, la pieza giratoria da un estacazo al patito, haciéndolo caer de la percha y picotear en un número inscrito en grande en la tira de papel.

Los informáticos puristas pondrán en tela de juicio que este mecano merezca realmente el título de "ordenador". No es, desde luego, programable en el sentido habitual; no es posible sentarse al teclado y escribir un programa para que el artilugio lo ejecute. Por otra parte, no hay duda de que se podrían cambiar los soportes de memoria, si bien con cierta dificultad, y de esta forma reprogramar la computadora para otros juegos. Imaginemos un dispositivo mecano que juegue al *go-moku narabe* (juego que se desarrolla sobre un tablero de 11 por 11, en el que un jugador procura colocar en línea cinco piedras negras, mientras se esfuerza en impedir que su adversario cree una línea de cinco piedras blancas). Sin embargo, una computadora mecano programada para el *go-moku narabe* se alzaría probablemente hasta la estratosfera.

La auténtica lección que el ordenador mecano puede enseñarnos reside en una sorprendente peculiaridad de la computación digital, a saber, que en la raíz misma de un cómputo yace meramente un flujo esencial de información. La "quincallería", o elementos tangibles del ordenador, puede adoptar muchas formas y diseños. Podríamos construir ordenadores de precisión perfecta no sólo con mecanos, sino también con cañas de bambú, cuerdas y poleas [véase "Juegos de ordenador", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1988], con tubos de plástico y agua, e incluso, lo que resulta bien extraño si nos detenemos a pensarlo, a partir de componentes eléctricos. Estos últimos han sido los elegidos, inútil es decirlo, por su mayor velocidad. Desde luego, daríamos prueba de gran cortedad de miras si nos mofásemos del ordenador mecano por la exclusiva razón de no ser electrónico. Después de todo, es muy posible que no sean cables y electrones los materiales óptimos para procesado rápido por ordenador. Los fotones y las fibras ópticas les están ganando terreno en buena lid.

En realidad, los mecanos resultan perfectamente idóneos para la computación digital. Por ejemplo, los soportes de memoria se valen de un principio binario: la presencia o ausencia de carretes denota el estado de un cuadrado concreto del tablero de tatetí. La pieza núcleo manifiesta su lógica digital: solamente puede girar si todos sus dedos dejan de tropezar en los correspondientes carretes de un soporte de memoria. Tal operación se denomina operación "y". Podemos ir siguiendo la lógica de la pieza núcleo en la figura 3: la pieza núcleo sólo podrá girar si en la primera sección falta el primer carrete y en la segunda sección falta el segundo carrete y en la tercera sección falta el tercero, y así sucesivamente; esto es, la pieza núcleo sólo girará si se cumplen a la vez las nueve condiciones. La belleza del ordenador mecano reside tanto en el ingenio de su mecánica como en la sutileza de su lógica.

A los puristas de los mecanos les alegrará saber que los estudiantes del MIT se atuvieron a las piezas originales —varillas y carretes— con apenas unas pocas excepciones. Hay alguna que otra barra de aluminio que atraviesa el montaje, para reforzarlo. Dos cables de alambre, un eje y una manivela transmiten a la impresionante máquina la fuerza motriz necesaria para la jugada siguiente. Finalmente, para dar firmeza a las uniones de varillas y carretes, los constructores se valieron de cola y pasadores finos, de los que suelen utilizarse para mantener en su lugar escudos heráldicos y placas conmemorativas. El equipo fue insertando los pasadores en orificios perforados desde el borde del carrete, atravesando el



4. Edward Hardebeck durante el montaje del ordenador mecano.

agujero central del mismo y el vástago que le sirve de eje, una tarea que fue preciso repetir más de mil veces. (En cierta ocasión, cuando Hillis entró en una ferretería para proveerse de varios miles de tales pasadores, el encargado se quedó de una pieza. Hillis, entonces, le espetó con toda seriedad: "es que tenemos un montón de escudos heráldicos".)

El ordenador mecano de tatetí sufrió el destino de casi todas las piezas expuestas en los museos: fue desmontado y embalado. Yace almacenado en el Mid-America Center, esperando ser nuevamente ensamblado y refulgir bajo la luz de los focos. Quién sabe si volverá a abrirse paso cliqueteando hacia su inexorable victoria, monumento a los sueños que los mecanos suscitaron en nuestra infancia.

Adentrado ya el sexto año de "Juegos de ordenador", sigo tan consciente como siempre de las muchas cosas que esta sección no puede conseguir. Dadas sus limitaciones de espacio y tiempo, no puede, por ejemplo, enseñar a programar a sus lectores, ni tampoco mencionar los centenares de programas fascinantes que éstos envían, ni las muchas ideas y anécdotas que me hacen saber. Seis años han sido necesarios para descubrir un remedio para estas y otras necesidades: un boletín. Se llama *Algorithm: The Personal Programming Newsletter*, y su primer número está ya disponible.

El boletín tendrá periodicidad bimensual. Da la impresión de que aloja muchísima información entre sus cubiertas. En concreto, tiene dos secciones dedicadas a quienes gustan de programar, una para principiantes y otra para los más avezados. Un "tablón de anuncios" de la contracubierta hará que sean públicos por vez primera algunos de los programas "underground" del mundo. Cartas, notas especulativas y artículos sobre las últimas novedades serán guía de la mente hacia territorio inexplorado. Estaré encantado de enviar una muestra gratuita del primer número a quienes me lo soliciten.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHARLES BABBAGE: ON THE PRINCIPLES AND DEVELOPMENT OF THE CALCULATOR AND OTHER SEMINAL WRITINGS. Charles Babbage et al. Dirigido por Philip Morrison y Emily Morrison. Dover Publications, 1961.

OPTICAL COMPUTING. Revista especial dirigida por Sing H. Lee y Ravindra A. Athale en *Optical Engineering*, vol. 28, n.º 4; abril de 1989.

Libros

Guías de campo, Sewall Wright, metalurgia extractiva y polen fósil

Jordi Agustí, Luis Alonso, Pedro Molera y Juan Montserrat

GUÍA DE CAMPO DE LOS FÓSILES DE ESPAÑA Y EUROPA, por J. Gómez-Alba. Omega; Barcelona, 1988.

Por el público al cual van dirigidas –estudiantes y recolectores aficionados– las guías de fósiles parecen tener unas características bien definidas, diferentes de las que caracterizan a los aspectos más generales de la paleontología: enfoque netamente sistemático del texto, clara preponderancia del código de la imagen sobre el código del texto y, finalmente, carácter local de la información suministrada. (Es impensable una guía de campo que abarque *todos* los fósiles del globo.) A pesar de ello, cuando se analiza con cierto detenimiento el variado número de textos surgidos en los últimos años y que aparecen bajo el epígrafe de "guía", se comprueba una extraordinaria diversidad de fórmulas, cuyo único común denominador es la presencia de abundantes láminas de fósiles. En realidad, algunas de las pretendidas "guías" se aproximan más al pequeño manual introductorio o al cuaderno de prácticas del estudiante.

La obra que venimos a comentar no es sospechosa en este terreno: de inmediato se presenta ante el usuario como un ejemplo compacto de guía-guía, sin contemplaciones ni concesiones. Los datos hablan por sí solos: 3300 citas de especies fósiles, repartidas en cerca de 1000 páginas, ilustradas a través de unas 5300 fotografías y unos 500 grabados. Teniendo en cuenta que los principales usuarios de este tipo de textos no son precisamente los especialistas en el tema, sino, más bien, los aficionados a la recolección de fósiles o quienes se dedican a la enseñanza, la guía sirve además como una adecuada introducción al frecuentemente enrevesado mundo de la taxonomía paleontológica, aspecto que la obra resuelve con una economía francamente puntillosa. Pero vayamos ya al análisis detallado de la obra.

El primer dilema que se plantea ante una guía de fósiles estriba en determinar en qué medida debe dar cuenta, asimismo, de los aspectos más generales de la paleontología (por ejemplo, procesos de fosilización o tipos de fósiles). En algunas proclamadas "guías de campo", este apartado llega a adquirir tal importancia que el texto se convierte en un pequeño manual de paleontología general. En el texto que comentamos, Gómez-Alba ha preferido soslayar este tipo de temas. La introducción –muy breve, apenas cuatro o cinco páginas– se ciñe a un conjunto de tablas cronológicas, así como a la glosa de diversos aspectos de la nomenclatura paleontológica: simbologías correspondientes a género, especie, autores, tipos, distribuciones geográfica y estratigráfica e historia particular de los ejemplares figurados. El contenido de este apartado parece adecuado, ya que son muchos los textos existentes que tratan del tema de la fosilización o de la paleontología estratigráfica. Por el contrario, los aspectos más formales son a menudo considerados como secundarios por parte del paleontólogo, poco consciente de las dificultades de orden práctico que suele afrontar el profano al encararse a un trabajo de clasificación en paleontología.

En cuanto a las tablas estratigráficas, el autor, aparte de las divisiones puramente cronoestratigráficas (como son los períodos, las épocas y las edades), añade también otras subdivisiones de tipo bioestratigráfico o, más simplemente, biocronológico, como son las edades de Mamíferos. En este caso, una interpretación demasiado rigurosa de las columnas puede llevar a confusión. Así, el límite Orleaniense-Astaraciense se hace coincidir exactamente con el límite Langhiense-Serravalliense, cuando los datos existentes sugieren que parte del citado Astaraciense (o Aragoniense superior) es todavía correlacionable con el Langhiense. Por otro lado, cierta tendencia a la economía de espacio hace que se mezclen en la misma columna tipos de unidades diferentes. Así, por debajo de la edad mastológica Ageniense, donde uno esperaría encontrar las edades mastológicas correspondientes al Oligoceno (Arverniense, Sueviense, etc.), aparece el término "Nummulítico", una categoría en desuso de la antigua bioestratigrafía marina. Por lo demás, dentro del apartado del Cuaternario, destaca la ausencia de cualquier referencia a la escala magnetoestratigráfica. A veces, estas pequeñas deficiencias encuentran su reflejo en el correspondiente glosario de términos. Así, leemos que el Aragoniense es un piso situado entre "el Aquitaniense superior y el Serravalliense medio marinos", estableciéndose, por tanto, una correlación entre las escalas marina y continental que, al menos en su límite inferior, es más que dudosa. A pesar de todo ello, el glosario de términos parece globalmente correcto e indica una capacidad de síntesis notable. Su utilidad para el no especialista es evidente, a condición de que lo interprete con cierta laxitud: las correlaciones marino-continental son meramente orientativas, en tanto que la revisión de algunas unidades bioestratigráficas es inminente. Lo realmente importante es la sucesión de categorías dentro de una misma columna, y no la relación lateral entre ellas.

Por lo que hace a la guía en sí, ésta se estructura de acuerdo con un criterio puramente taxonómico (los fósiles se enumeran de acuerdo con su tipo, clase, orden, etc.), más que en relación con la escala cronoestratigráfica. Sin embargo, un enfoque cronológico (Paleozoico, Mesozoico, Cenozoico) hubiese permitido la partición de la obra en tres tomos independientes, lo cual hubiese aligerado en peso y presupuesto al ya de por sí poco manejable volumen. Por lo demás, de cada especie se cita su autor, año de creación, sinonimias y distribución geográfica y estratigráfica. Se señala, asimismo, la localidad de procedencia del ejemplar, la colección a la que pertenece, su nú-

mero de catálogo, escala y, eventualmente, si ha sido previamente figurado y dónde. Como se ve, poco más puede pedirse a un sistema de notación más próximo a la ficha museológica que a la breve reseña que suele encontrarse en estos casos.

En relación con el código de la imagen, tan importante como el texto mismo en el caso de las guías de campo, hay que destacar el notable esfuerzo realizado por el autor y los editores en este caso: esfuerzo por parte del autor al reunir más de 5000 fotografías técnicamente impecables; esfuerzo por parte del editor, al lograr una impresión cuidada y nítida de las mismas (nos viene a la cabeza el ejemplo de otra guía recientemente publicada, malograda por la pésima reproducción de su parte gráfica). En muchos casos (especialmente en braquiópodos y moluscos), los ejemplares son ilustrados en dos o tres perspectivas distintas. En algunas especies, es discutible la información que puedan aportar los ejemplares figurados a la hora de su identificación: es el caso de rinocerótidos y algunos perisodáctilos, cuya sistemática a nivel específico se basa más en el esqueleto postcraneal que en la dentición. Siguiendo en el campo de los vertebrados, tal vez se observe un exceso de denticiones de rumiantes y équidos (la distinción en muchos casos entra en el dominio del especialista), en tanto que el cuaternarista notará alguna ausencia aislada (*Ursus deningeri*, o *Dicerorhinus hemitoechus*). Finalmente, una ausencia que debería subsanarse en sucesivas ediciones: en ninguna parte se indica al recolector qué debe hacer cuando encuentra un yacimiento de fósiles y las normas que deben regir su preservación. En este sentido (recuérdese que estamos hablando de una guía "de España y Europa") no hubiese sobrado un *addendum* con la dirección de las principales instituciones científicas a las que el aficionado puede acudir cuando se realiza un hallazgo de tipo paleontológico.

Con todo, las ausencias mencionadas más arriba no pueden empañar un resultado inequívocamente satisfactorio, que inaugura una nueva manera de hacer en un campo poco trillado en nuestro país. Bien es verdad que pocos paleontólogos se hubiesen visto dispuestos a abordar un proyecto semejante y, en este caso, la condición de conservador de Gómez-Alba no es ajena al resultado. Hubo un tiempo en que todo lo que sonase a sistemática paleontológica era abominado públicamente en los círculos geológicos. La batalla de los "listines telefónicos" se saldó con un descrédito generalizado para todo lo que fuese la catalogación o enumeración de especies fósiles. A tal situación sólo se puede llegar cuando desde ambos bandos se tiene una visión miope e incapaz de otorgar un significado a la realidad que representa la diversidad de la vida. Sin embargo, el estudio de los factores que han canalizado la evolución de la biosfera sólo puede realizarse a partir de la historia de esa diversidad. Obras como la de Gómez-Alba constituyen un destacado homenaje a esa historia y es deber del paleontólogo reconocerlo y congratularse de ello. (J. A.)

SEWALL WRIGHT AND EVOLUTIONARY BIOLOGY, por William B. Provine. The University Chicago Press; Chicago, 1989.

Salvo un brevísimo apéndice (p. 499), escrito el 26 de marzo de 1988, esta obra es la reimpresión de la publicada dos años antes. Motivos de espacio son los únicos aducibles en nuestro descargo por no habernos ocupado hasta ahora de esta biografía considerada, por la crítica, modélica y única en su género. Del biografiado y su obra, fundamentora de la genética cuantitativa, nos ocuparemos más abajo. Adelantemos unas breves palabras sobre el cronista.

William B. Provine realizó su tesis doctoral, dirigida por Richard Lewontin, sobre los orígenes de la genética, que resumió en un opúsculo de cartesiana luz, editado ahora de nuevo por la Universidad de Chicago: *The Origins of Theoretical Population Genetics*. Siguió ahondando en aspectos parciales del tema, sin perder nunca de vista el conjunto en que se encuadraba; me refiero, por ejemplo, a las introducciones a los distintos capítulos del libro que dirigió con Ernst Mayr (*The Evolutionary Synthesis*). O aclaró puntos socorridos, aunque nunca bien entendidos en su pleno sentido; y estoy aludiendo, en particular, al cambio que supuso la deriva genética (en la obra colectiva *Dimensions of Darwinism*). Hoy da clases de historia de la biología en la sección de ecología y sistemática de la Universidad neoyorquina de Cornell.

Sewall Wright cumpliría este año el centenario de su nacimiento. Perteneció a una generación que en física, química, biología, geología y matemática, por lo menos, tuvo que crear la vía segura del conocimiento de su disciplina. Por eso hay quien opina que el esfuerzo principal de los historiadores de la ciencia debiera empeñarse en rehacer la biografía de los que aún quedan vivos para recuperar memoria e interpretación de los hechos que todavía se está a tiempo de salvar. Provine, que participa de esta idea, mantuvo estrecho contacto con Wright, yendo aquél a casa de éste, magnetofón en mano, releyendo con él artículos, comentarios o copias en carbón de cartas enviadas y sus respuestas, ambientando fotos, hurgando en la biblioteca; y viniendo Wright a la casa de campo de Provine para repasar lo resumido por éste.

Esa cercanía de trato es obviamente impensable en otros lugares u otras materias. La genética cuantitativa, dejando aparte los biómetras ingleses, es ciencia dominada por las principales universidades norteamericanas del primer tercio del siglo XX. Ocurre, además, que la movilidad del profesorado y algunos centros catalizadores, verbigracia, los cursos de verano de Cold Spring Harbor, favorecen los intercambios de puntos de vista. (Cursos estivales que en nada se parecen a los promovidos en otros lugares aquende el océano para dar holganza pagada a los adictos al partido o similares deturpaciones.) Esos encuentros dieron pie a la estrecha relación entre Sturtevant, del grupo de Morgan sobre *Drosophila*, la otra gran corriente de genética de poblaciones, y Wright.

La mosca del vinagre se convertiría, por su pronta reproducción, en modelo de la mayoría de las escuelas de observancia morganiana hasta nuestros días. Wright, empero, siguió con otro tipo más reacio, menos gratificante, pero no menos importante al tratarse de mamíferos: los cobayas. Desde 1912, comienzo de su formación en Harvard, hasta su último año en Chicago, en 1955, y, en particular, el decenio 1925-1935, los dedicó a la genética fisiológica de los conejillos de Indias: cruzamiento endogámico, ligamiento, factores determinantes del cromatismo de la piel, trasplante, resistencia a enfermedades, selección, etcétera.

Abordó esos estudios desde una óptica matemática, que fue perfeccionando con el tiempo. Y en eso personificó el cambio de una visión naturalista, descriptiva, de los fenómenos, hacia un planteamiento cuantificable, lo mismo que otros harían desde una perspectiva física o química. Su primer trabajo como topógrafo y, sobre todo, los diez años (1915-1925) en la secretaría de mejora animal del Ministerio de Agricultura fueron, a este respecto, sumamente creadores de útiles estadísticos como el denominado "método de los coeficientes".

Su principal impulso a la teoría moderna de la evolución, que conjuga el mendelismo, el darwinismo y la biometría, débese, entre otras razones, a su análisis del aislamiento geográfico de las especies y, en particular, al llamado "principio de Sewall Wright" o deriva genética al azar, en virtud de la cual las fluctuaciones aleatorias de la frecuencia génica en una población pueden conducir, a través de varias generaciones, hasta la fijación de un alelo y a la extinción de otro. No se agota en esos dos ejemplos sus aportaciones al asentamiento del modelo evolutivo de la biología. Sus disputas con el matemático Fisher, o su relación amistosa con Dobzhansky, la importancia concedida a la adaptación y la cuantificación de la influencia del medio constituyen retazos de la "herencia en mosaico" que caracteriza la situación a que ha llegado la biología contemporánea. Provine, además, sabe contar las cosas y cuidar el fondo y la forma, el esbozo estadístico sin madurar y la anécdota casi profética del niño que empieza a ponderar masas con la romana del desván familiar. (L. A.)

FENOMENOS DE TRANSPORTE EN METALURGIA EXTRACTIVA, por José Luis Otero de la Gándara. Colección Alhambra Universidad. Ed. Alhambra; Madrid, 1988.

Los metales han acompañado al hombre desde la entrada de éste en la historia. Los pueblos primitivos pasaron de la prehistoria a la historia cuando descubrieron el uso de los metales. Oro, cobre, bronce y hierro fueron los primitivos metales utilizados. Actualmente, en el sistema periódico de los elementos químicos existen setenta metales, capaces de interactuar mutuamente y de formar miles de interesantes aleaciones, con un inimaginable abanico de propiedades. Propiedades susceptibles de modificarse por tratamientos mecánicos, térmicos y químicos. Pues esta posibilidad que ofrece la tecnología metalúrgica actual es real gracias a la existencia de la metalurgia extractiva.

De estas consideraciones se infiere la importancia práctica de la metalurgia extractiva, parte de la metalurgia que trata de la obtención de los metales a partir de sus menas y de otras materias primas. Las operaciones propias de la metalurgia extractiva constituyen aspectos de la ingeniería del reactor químico, de las operaciones de separación y de los fenómenos de transporte.

Bajo el concepto de fenómenos de transporte se engloba la transmisión o transporte, ambas palabras son sinónimas, de cantidad de movimiento, energía o materia, a través de medios homogéneos o heterogéneos. Este transporte tiene lugar porque existe en la dirección del flujo una variación de una fuerza impulsora, que es la causante del flujo de cantidad de movimiento, materia o energía, al que se opone una resistencia, que depende de las propiedades físicas del medio y sus características geométricas.

La fuerza impulsora es una velocidad, temperatura, concentración o presión parcial. La resistencia en cada caso se tendrá que definir en forma adecuada, aunque es evidente que, desde el punto de vista formal, su sentido físico es el mismo.

El fenómeno de transporte ha de estudiarse en situaciones de régimen estacionario y no estacionario, en las que la fuerza impulsora, así como la resistencia del medio, no varía o varía con el tiempo, con manantiales o sumideros de materia o energía, expresión con la que se indica la posibilidad de que en determinada zona del sistema aparezca o desaparezca materia o energía.

En general, en cada uno de los fenómenos de transporte se efectúa su estudio, en este libro, eligiendo en primer lugar las situaciones en régimen estacionario para posteriormente pasar al estudio más complejo en régimen no estacionario. La existencia de manantial o sumidero de materia o energía son también un problema que se plantea cuando su interés formativo o práctico lo aconseje.

Esta obra abarca el estudio de los fenómenos de transporte en el amplio campo de posibilidades en metalurgia extractiva, en las operaciones y procesos que se realizan desde el mineral hasta conseguir un compuesto metálico o un metal; comprende las diferentes operaciones o procesos con los que se mejoran sus propiedades o se les da la forma precisa para su posterior utilización.

El primer capítulo de este libro está dedicado a definir los fenómenos de transporte en metalurgia extractiva, tanto en hidrometalurgia como en pirometalurgia y en electrometalurgia. Seguidamente (capítulo 2), se describen los métodos para obtener la función matemática que define el fenómeno de transporte, destacándose la interpretación estadística de la respuesta del fenómeno de transporte a la variación de sus parámetros.

El capítulo inmediato se destina a estudiar el flujo de los fluidos: propiedades (densidad, presión, viscosidad, tensión superficial), balances de materia y de energía, fluidos compresibles y fluidos incompresibles, tuberías, válvulas, bombas, compresores, etcétera. La medida de las características del flujo es objeto de consideración en el capítulo cuarto. Manómetros, contadores de desplazamiento, contadores de rotor, medidores de caudal, anemómetros, tubos de Pitot y otros se describen con gran profusión de detalles.

Las condiciones de flujo en circuitos especiales de gran interés metalúrgico son objeto de atención en el siguiente capítulo. Se estudian los medios porosos, el lecho fluidizado, los humos calientes, los metales fundidos, las escorias, los convertidores, las lanzas, la cavitación, la agitación, los rociadores y los sistmas de ventilación.

En el capítulo sexto se describe el transporte del calor. La conductividad, la convección y la radiación térmicas, los calores latentes, los calores específicos, la condensación, la ebullición y el coeficiente de transferencia del calor son objeto de estudio en este apartado del libro. A continuación, se abordan los métodos para obtener la ecuación de transporte de calor. Se trata de métodos analíticos en regímenes estacionarios, transitorios y no estacionarios con y sin generación de calor, además de los métodos numéricos, gráficos y analógicos. Los cambiadores de calor se estudian en el capítulo octavo: los cambiadores directos e indirectos, los generadores de calor, los evaporadores, los condensadores, etcétera. La fusión, la solidificación y la colada constituyen el objeto del capítulo nono. El libro termina con el transporte de materia: mecanismos de transporte y modelos, transporte de materia en una fase, cambiadores de materia entre fases, transporte simultáneo de materia y calor entre dos fases, etcétera.

Para finalizar, conviene recordar que a lo largo del libro hay un conjunto muy interesante de ejemplos numéricos. Los ejemplos numéricos se han elegido, en general, considerando situaciones simples, de importancia en metalurgia, que exigen un tratamiento sencillo. El enunciado de los problemas sirve también para describir brevemente operaciones o procesos metalúrgicos.

En todo el conjunto del libro se ha pretendido facilitar el entrenamiento en el método científico, al llegar al conocimiento en forma ordenada, junto con el empleo del criterio ingenieril correcto y la familiarización con la utilización de datos empíricos. Acompaña al texto una selecta y completa biblio-

grafía que abre, en cada capítulo, mayores posibilidades de información para el interesado. (P. M.)

PALEOPALYNOLOGY, por Alfred Traverse. Unwin Hyman; Boston, 1988.

La paleobotánica se presenta al profano como un mundo incompleto y discontinuo, fragmentado en el espacio y el tiempo. Esta sensación no es fácil de evitar en muchas de las ramas de la paleontología que estudian organismos que desarrollaron su existencia en tierra firme. Las posibilidades de fosilización son escasas y, además, los registros suelen tener una fuerte significación local.

La palinología aparece como una alternativa interesante a los estudios paleobotánicos tradicionales. Las esporas y los granos de polen los producen en grandes cantidades algunas especies vegetales, y unen a su fácil dispersión una gran capacidad de conservación. Diferentes ambientes sedimentarios en medios marinos y continentales (deltas, marismas, lagos, etcétera) se transforman en registros susceptibles de análisis.

Con una orientación eminentemente práctica, el libro de Traverse resume los conocimientos que ha producido la aplicación de la técnica palinológica a sedimentos de todas las edades. El autor no se limita a tratar de las esporas y los granos de polen; incluye otros tipos de microfósiles útiles como biozonadores y que tienen una metodología de análisis similar (acritarcos, quitinozoos, dinoflagelados y otros).

Los intereses y objetivos que han hecho posible el desarrollo de la palinología condicionan los resultados que se han obtenido utilizando esta técnica de análisis. Las investigaciones realizadas sobre sedimentos recientes se enfocan hacia problemas de tipo paleoclimático y paleoecológico, mientras que en el resto predomina una orientación bioestratigráfica. Merece la pena destacar que la palinología es uno de los escasos métodos que permiten correlacionar secuencias continentales y marinas, problema de gran importancia en los trabajos de prospección de hidrocarburos.

El libro está estructurado en 18 capítulos. Los cinco primeros tratan de generalidades: definiciones y una historia de la palinología contada por uno de sus protagonistas, con un apartado muy útil dedicado a comentar los libros, revistas y organizaciones más importantes de la especialidad; ventajas, desventajas y objetivos que pueden ser cubiertos con este método; consideraciones sobre la naturaleza de la esporopolenina en relación con el problema de separar el material esporo-polínico del resto del sedimento; ciclos reproductivos de las especies vegetales y morfología de esporas y polen, en donde se introduce el sencillo código de clasificación de la compañía Shell.

A lo largo de otros once capítulos se describen los rastros que ha dejado una historia apasionante. Los principales microfósiles que se encuentran en los sedimentos comprendidos entre el Precámbrico y la actualidad van desfilando ante el lector en una sucesión profusa de fotografías e ilustraciones con comentarios documentados, aunque a veces esquemáticos, sobre los principales acontecimientos evolutivos. En la historia de la vegetación resulta útil distinguir tres grandes episodios, cuyos límites no coinciden con los períodos clásicos utilizados en geología (Proterozoico, Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico). Un primer período denominado Paleofítico comprende desde la colonización del continente por las primeras especies vegetales terrestres, en el Silúrico, hasta la sustitución de los grandes helechos por coníferas, a mediados del Pérmico. El período Mesofítico está caracterizado por el predominio de las gimnospermas. Con el desarrollo de las angiospermas en el Cretácico Superior, empieza un tercer gran período que se denomina Cenofítico.

La taxonomía polínica de las primeras etapas de período Cenofítico es especialmente compleja, puesto que se enfrenta a dos necesidades conflictivas. Por una parte, al iniciarse el desarrollo de las principales familias que dominan la flora actual, debería ser posible utilizar un sistema de clasificación más relacionado con la nomenclatura botánica y abandonar las clasificaciones descriptivas que se utilizan en los períodos anteriores. Sin embargo, al desconocerse casi todo sobre la morfología de las plantas que producían los primeros granos de polen de angiospermas, las determinaciones suelen ser muy aventuradas. En este sentido, resulta curioso que se conozca mejor el tipo de formas vegetales que producían las esporas y polen del Carbonífero que la de las primeras angiospermas del Cretácico e incluso de comienzos del Cenozoico, puesto que son mucho mayores las posibilidades de estudiar fructificaciones fosilizadas.

Dos capítulos y un apéndice cierran el libro. El penúltimo capítulo, uno de los más originales e interesantes, aborda la dispersión y sedimentación de las esporas y el polen en medios continentales y marinos. En la interpretación de espectros polínicos obtenidos en sedimentos marinos, los problemas de dispersión adquieren especial interés. Pero en los manuales clásicos, dirigidos a palinólogos que trabajan en lagos y turberas, siempre se observa el problema de la dispersión de las esporas y el polen desde el continente. Finalmente, el autor coloca en un cajón de sastre diferentes ideas sobre la aplicación práctica de la palinología, considerando desde la posibilidad de análisis de rocas con diferentes grados de metamorfismo hasta el uso de técnicas estadísticas, pasando por una discusión sobre la utilidad de la palinología en bioestratigrafía. En un extenso y completo apéndice sobre técnicas de laboratorio se defiende con entusiasmo que son muy pocos los instrumentos realmente imprescindibles para realizar un buen análisis.

A partir de una dilatada experiencia profesional en el campo de la paleopalinología el autor intenta dar una visión personal de un campo tan extenso como el abarcado por el libro. Desde una perspectiva individual resulta difícil conseguir el enfoque y el nivel adecuados a cada período. Así, por ejemplo, con el desarrollo de la estratigrafía isotópica han perdido interés las largas discusiones nomenclaturales que caracterizaban la geología del Cuaternario y que todavía encuentran eco en este libro. Sin embargo, se ha diseñado una obra con unidad de estilo y planteamiento. Aunque no sobra imaginación en la ordenación y elaboración del material presentado, llegando incluso el texto en ocasiones a ser repetitivo, se ha realizado un esfuerzo notable de síntesis que, sin duda, servirá de punto de partida para el estudiante que desee introducirse en este mundo de literatura bastante inaccesible.

Es necesario esperar todavía para ver cómo la información que surge del campo de la palinología se va completando y se puede intentar una visión de conjunto sobre bases más amplias. Un paso importante en este sentido se dará cuando, desde la interesante perspectiva que ha alcanzado la palinología en el ámbito cultural sajón, se consiga incorporar la rica literatura de los países del Este. Mientras tanto, los curiosos y los interesados en participar en el esfuerzo encontrarán en este libro una referencia imprescindible. Unos y otros se beneficiarán de la amplitud del punto de vista desarrollado en la obra, y especialmente los segundos apreciarán el enorme pragmatismo de Traverse, tan necesario al enfrentarse a un problema de dimensiones casi descomunales. (J. M.)

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1989. Se incorpora, asimismo, la relación alfabética de las secciones* Taller y laboratorio *y* Juegos de ordenador.

AUTORES

TITULOS

TALLER Y LABORATORIO

Jearl Walker

JUEGOS DE ORDENADOR

A. K. Dewdney